

استقرارية أنظمة القدرة

Power System Stability

الأستاذ الدكتور

محمد توفيق الزهيري

الإصدار الأول

المؤلف في سطور

الأستاذ الدكتور محمد توفيق لازم الزهيري



حاصل على شهادتي البكلوريوس والماجستير في الهندسة الكهربائية من كلية الهندسة / جامعة بغداد سنة 1967 و1975 على التوالي وشهادة الدكتوراه من جامعة برادفورد في بريطانيا سنة 1981. عمل مهندسا للمشاريع العسكرية في وزارة الدفاع العراقية للفترة من 1967 ولغاية 1976 صمم ونفذ خلالها مشاريع هندسية كبرى ثم عين تدريسيا في قسم الهندسة الكهربائية والالكترونية في الكلية الهندسية العسكرية العراقية عام 1976 حيث شغل منصب رئيس قسم الهندسة الكهربائية والألكترونية في الكلية المذكورة للفترة من 1986 ولغاية 1991 انتقل بعدها الى كلية المنصور الجامعة حيث شغل منصب رئيس قسم علوم الحاسبات1991 – 1994. وعمل استاذاً في جامعة فيلادلفيا – ألأردن للفترة من 2007 لغاية 2020 .

أسس مكتب هيا استشاريون في بغداد - قطاع خاص – حيث عمل في مجال النفط والغاز ومحطات التوليد الكهربائية مع وزارا ت النفط والكهرباء والصناعة في العراق والجماهيرية الليبية للفترة من 1994 ولغاية 1999 ثم عين بعد ذلك تدريسيا ورئيسا لقسم الهندسة الالكترونية والإتصالات في جامعة النهرين - العراق للفترة من 2000 ولغاية 2007 عمل خلالها ايضا استشاريا لعدة محطات لتوليد الكهرباء في العراق واستشاريا لمصافي النفط وكذلك استشاريا للمنشأة العامة للمشاريع الصناعية وهيئة الكهرباء / مركز السيطرة الوطنية وشركة ابن رشد العامة لمشاريع المياه والشركة العامة للمنظومات الألكترونية حيث صمم وأشرف على تنفيذ العديد من المشاريع الهندسية الإستراتيجية . كذلك ساهم بتأسيس المجموعة الهندسية الاستشارية وفروعها الثلاثة في بغداد وعمان ودبي 2004 – 2009. وعمل أيضا محاضراً خارجياً في جامعة بغداد والجامعة التكنولوجية للفترة من 1983 ولغاية 2000 . له أكثر من 70 بحثا وتقرير بحث ومساهمات علمية في مؤتمرات دولية في مجال الهندسة الكهربائية والألكترونية منشورة في اميركا وبريطانيا والهند وكوريا وكندا وتونس والاردن والعراق والمانيا . حاصل على عدة براءآت اختراع مسجلة في دائرة المخترعات البريطانية في لندن وفي ميونخ وطوكيو وبغداد. أشرف على 32 رسالة ماجستير واطروحة دكتوراه . له 9 كتب مؤلفة ومترجمة في مجال الهندسة الكهربائية والألكترونية .

للإتصال بالمؤلف -- الإيميل : drmohamadtofik@yahoo.com

إستقرارية أنظمة القدرة الكهربائية

تأليف

الأستاذ الدكتور محمد توفيق لازم الزهيري
أستاذ الهندسة الكهربائية والألكترونية

Dr.Mohammed Tawfeeq Lazim Alzuhairi
Professor of Electrical and Electronics Engineering

شباط - فبراير 2024

نتاج العمل هذا مهدى إلى أهلنا المرابطين
والمجاهدين في فلسطين وخاصة أهلنا في غزة
الصامدة

بسم الله الرحمن الرحيم

{ أُذِنَ لِلَّذِينَ يُقَاتَلُونَ بِأَنَّهُمْ ظُلِمُوا
وَإِنَّ اللَّهَ عَلَىٰ نَصْرِهِمْ لَقَدِيرٌ }

اللهم الأرض أرضك والسماء سماءك
والمسجد الأقصى بيتك والعباد عبادك
اللهم سخر لأهلنا في غزة ملائكة السماء
وجنود الأرض يارب نصرك الذي وعدت

المحتويات

الفصل الأول

الميزات العامة لمنظومات القدرة الكهربائية الحديثة

الفصل الثاني

مقدمة لموضوع استقرارية منظومة القدرة

الفصل الثالث

الماكنة التزامنية في منظومة القدرة

الفصل الرابع
ديناميكية الماكنة التزامنية ومعادلة التأرجح

الفصل الخامس
اشتغال الماكنة التزامنية تحت الظروف العابرة

الفصل السادس
إستقرارية الحالة المستقرة

الفصل السابع
الإستقرارية العابرة

الفصل الثامن

قاعدة المساحات المتساوية لحل الإستقرارية العابرة

الفصل التاسع

استقرارية الفولتية واستقرارية التردد

الفصل العاشر

تأثير محطات الطاقة المتجددة على استقرارية منظومات القدرة

الفصل الحادي عشر
طرق تحسين استقرارية منظومات القدرة

ألملاحق والمراجع

مقدمة الإصدار الأول

بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله الذي وهب للإنسان نعمة العقل ، وخصه على سائر مخلوقاته بالعلم والعمل ، وفضل أهل العلم ورفعهم درجات وبعد ؛ فإن المكتبة العربية ما تزال فقيرة في كثير من العلوم الحديثة ، خاصة ما تضمنه هذا الكتاب من مادة ومهمة وهي استقرارية أنظمة القدرة التي تعتبر مادة متقدمة في مجال الهندسة الكهربائية حيث تدرس في الصفوف المنتهية أو المتقدمة في أقسام الهندسة الكهربائية في الجامعات كافة وكذلك تخص المهندسين العاملين في محطات توليد الطاقة الكهربائية وأنظمة شبكات النقل والتوزيع بصورة خاصة. وكذلك الطلبة الجامعيين في الدراسات العليا في اختصاص القوى الكهربائية.

لقد تبلورت فكرة تأليف هذا الكتاب من قبل المؤلف لما رابه خلو المكتبات العربية من كتب مترجمة أو مؤلفة هذا الموضوع الذي يعد من المواضيع المعقدة والصعبة نوعاً ما ، وكذلك لما لقيه من تشجيع كبير من قبل زملائه الأساتذة في الجامعات العربية التي قام بتدريس هذا الموضوع فيها لسنوات طويلة . ولم يكن في الميدان من الكتب العربية ما يمكن أن يتقدم على هذا الكتاب بحيث يغني عن النهوض بهذا العبء الجسيم.

سيجد القارئ في هذا الكتاب مادة علمية غزيرة، ومواضيع جديدة ، وارتباطا بين مواد فصوله ، وتآلفاً في محتوياته ولقد كانت صياغة المادة العلمية لهذا الكتاب بحيث يقرب المصطلحات الأجنبية إلى لغة الضاد أمر شاق جدا ؛ خاصة في اختيار الكلمات المناسبة والبسيطة لكي يستطيع القارئ العربي فهمها بسهولة. وقد روعي أيضا أن تعطى المصطلحات المهمة باللغتين العربية والإنجليزية ليسهل على القارئ الكريم فهمها وإدراكها .

يتألف هذا الكتاب من احد عشر فصلا وضعت لملائمة حاجة المهندسين الكهربائيين والطلبة الجامعيين في المراحل المتقدمة في دراسة الهندسة الكهربائية. وقد زود كل فصل من هذا الكتاب بمقدمة تعطي تعاريف بمادة الفصل وإظهار للنظرية الأساسية. وقد حرصنا على إعطاء أمثلة محلولة عند الشعور بأنها تضيف وتوضح النص بأسلوب بسيط ومفيد. والسبب في إعطاء الأمثلة المحلولة هذه هو أن القارئ يميل إلى الرغبة في تطبيق المعرفة ضمن نطاق عمله ويحتاج الى الممارسة العملية لاستكمال المعلومات من أوجه الموضوع المختلفة.

إن المؤلف إذ يرحب بأي انتقاد بناء لهذا الكتاب سوف يكون ممتنا إذا ما تم تزويده بأية ملاحظات أو عن أي خطأ وارد أو تعقيب يسهم في تقويمه لإظهاره بالشكل الأمثل. وفي الوقت

نفسه يتقدم المؤلف بالشكر الجزيل إلى المهندس الإستشاري طارق الجميلي رئيس الحشد الشعبي لإعمار العراق سابقاً الذي قام بالقراءة الأولية لفصول الكتاب وإبداء ملاحظاته القيمة .

وأود أن أبين للقارئ الكريم أن ترقيم المعادلات في هذه الكتاب تقرأ من اليسار الى اليمين. أما ترقيم الفقرات والأشكال والجداول وغيرها فتقرأ من اليمين إلى اليسار ، وأود الإشارة اليه كذلك إلى أن الأحرف اللاتينية والمصطلحات الإنكليزية التي تظهر خلال الأسطر تقرأ من اليسار الى اليمين ، آملين أن نكون قد وفقنا في مجهودنا هذا قد ساهمنا في إغناء المكتبة العربية الفتية التي لاشك أن بها حاجة إلى المزيد من الكتب والمراجع لكي يستفيد منها الطلبة والمهندسون ورجال الصناعة .وفق الله الجميع لما هو خير الأمة العربية والبشرية جمعاء وهو تعالى من وراء القصد .

المؤلف

لندن في شباط - فبراير2024

الفصل 1 الميزات العامة لمنظومات القدرة الكهربائية الحديثة

1-1 مقدمة

تعد الطاقة الكهربائية من انظف أنواع الطاقة التي عرفها الانسان في وقتنا الحاضر التي تتميز بكونها يمكن أن تنقل لمسافات بعيدة بدون تلويث للبيئة واستخدامها بشكل يسير في المصانع والمتاجر والمنازل. وتشكل هندسة منظومات القدرة الكهربائية مساحة شاسعة وكبيرة كجزء من دراسات الهندسة الكهربائية. التي تهتم بشكل رئيسي بإنتاج الطاقة الكهربائية ونقلها وتوزيعها واستخدامها . ومنذ القرن العشرين ، وحتى العصر الحديث ، اعتمدت جميع محطات توليد الطاقة الرئيسية في العالم بشكل أساسي على نظام التيار المتناوب باعتباره الخيار الأكثر فاعلية واقتصاديًا لتوليد ونقل الطاقة الكهربائية ذلك لأن التيار المتناوب يمتاز على التيار المستمر الذي كان يستخدم في توليد الطاقة الكهربائية في أول ظهور استخدام هذه الطاقة في نهايات عام 1870 إذ ان مستويات التيار المتناوب يمكن تحويلها بسهولة بحيث تعطي مرونة في توليد ونقل واستهلاك الطاقة الكهربائية وأصبحت المجتمعات الحديثة تعتمد بصورة شبه كلية على الطاقة الكهربائية في شتى نواحي الحياة.

خلال الفترة المبكرة لاستخدام التيار المتناوب في نقل القدرة الكهربائية لم يكن التردد قياسياً ومتفق عليه في ذلك الوقت ، حيث استخدمت ترددات مختلفة مثل 25 ،50، 60، 125 هرتز لكن هذه الترددات المختلفة جعلت الترابط البيني لمنظومات القدرة المختلفة أمراً صعب جداً . لذلك تم اختيار تردد 50 هرتز في معظم بلدان العالم و60 هرتز في اميركا الشمالية كقيم قياسية دولية.

ونظراً لبروز أهمية الطاقة الكهربائية باعتبارها أحد العناصر الأساسية للتطور الاقتصادى والاجتماعى في المجتمعات المعاصرة فقد قدمت الكثير من الدول الدعم لقطاع الكهرباء والمتمثل في انجاز مشاريع الكهرباء الضخمة المنتجة للطاقة الكهربائية مما نتج عنه التوسع الكبير في استعمال الوسائل العصرية في المعيشة والعمل وما يتطلبه من استخدام أجهزة وآلات تعتمد في تشغيلها على الطاقة الكهربائية .هذا التوسع الكبير أدى الى زيادة الحاجة لنقل كميات كبيرة من الطاقة لمسافات بعيدة جداً مما خلق حوافز تصاعدية لاستخدام مستويات أعلى من فولتيات النقل . ففي البداية كانت الفولتيات المستخدمة 11 و33 و 66 كيلو فولت وقد تم رفعها إلى 132 كيلو فولت في عشرينيات القرن الماضي ، ثم 400 كيلو فولت في ستينيات

القرن الماضي أيضاً. وفي الفترة نفسها تم استخدام 765 كيلو فولت في الولايات المتحدة الأميركية عام 1969.

وفي البلدان التي تحوي مسافات شاسعة التي تتضمن انشاء خطوط نقل هوائية تزيد عن 500 كيلو متر وكيبلات نقل أرضية تزيد على 50 كيلومتر يتم استخدام تيار مستمر بفولتية عالية جداً HVDC لنقل كميات كبيرة من الطاقة وذلك لتقليل الخسائر في القدرة جهد الإمكان. علاوة على ذلك فان النقل بالتيار المستمر يؤمن وصيل لا تزامني بين المنظومات المرتبطة بينياً بحيث يحسن كثيراً من اسقرارية هذه المنظومات.

1-2 منظومة القدرة الكهربائية

وظيفة منظومة القدرة الكهربائية هي تحويل الطاقة من إحدى صيغها الموجودة في الطبيعة إلى طاقة كهربائية ومن ثم نقلها إلى أماكن استهلاكها . هذه الطاقة من النادر أن تستخدم بصيغتها الكهربائية المطلقة لكنها يتم تحويلها إلى صيغ مختلفة مثل الحرارة أو الضوء أو إلى طاقة حركية (ميكانيكية) .ويمكن تعريف منظومة القدرة الكهربائية كونها عبارة عن شبكة كبيرة من الأجهزة الكهربائية مترابطة مع بعضها كنظام متكامل بهدف توليد ونقل وتوزيع الطاقة الكهربائية لمستخدميها. في معظم الاحيان تشغل منظومات القدرة الكهربائية مناطق شاسعة و كبيرة، و إن الترابط بين شبكات نظم القدرة يؤدي إلى ازدياد حجمها ازديادا كبير جدا بحيث تكون حاوية على عشرات الآلاف من العقد والفروع.

ومن الامثلة الشائعة لمنظومات القدرة الكهربائية هو احتوائها عل محطات التوليد المركزية التي تولد الطاقة باستخدام التوربينات البخارية أو التوربينات الغازية أو التوربينات المائية (الهايدروليكية) ثم تقوم المحولات الكهربائية برفع الفولتية المتولدة إلى مستويات فولتيات النقل ثم تنقل الطاقة بواسطة خطوط النقل إلى محطات ثانوية كهربائية لغرض خفض الفولتية مرة أخرى إلى المستويات التي يحتاجها المستخدمين في المصانع والمتاجر والمنازل.لذلك تقسم منظومة القدرة إلى حلقات أربع هي التوليد والنقل والتوزيع والاستخدام . وكما ذكر سابقا فان من محاسن وفوائد الطاقة بصيغتها الكهربائية هي إمكانية نقلها وتحويلها والتحكم بها بسهولة مع قدركبير من الكفاءة والوثوقية العالية.

1-3 بنية منظومة القدرة الكهربائية STRUCTURE OF THE POWER SYSTEM

تتفاوت منظومات القدرة في حجمها والمعدات المكونة لها ، لكنها على أية حال، جميعها لها المميزات والخصائص الأساسية نفسها التي تتمثل بالآتي:

- تتضمن منظومات تيار متناوب ثلاثية الطور تعمل أساساً بفولتية وتردد ثابتين . التوليد والنقل فيها يشتمل على معدات ثلاثية الطور. ويتم تجهيز الأحمال الصناعية للمصانع بمغذيات ثلاثية الطور، أما المرافق السكنية والتجارية فيتم تجهيزها عادة بطور واحد أو بثلاثة أطوار حسب الحاجة وتتوزع الأحمال على الأطوار الثلاثة بصورة مناسبة لتحقيق التوازن المطلوب على المنظومة.
- تستعمل المنظومات جميعها مكائن تزامنية لتوليد الطاقة الكهربائية والمدورات الأساسية التي تقوم بتدويرالمولدات Prime movers تحول المصادر الأولية للطاقة مثل الوقود الأحفوري (النفط ومشتقاته) أو الوقود النووي أو طاقة المياه المخزونة في السدود إلى طاقة ميكانيكية وهذه بدورها تحول إلى طاقة كهربائية بواسطة المولدات التزامنية.
- نقل الطاقة الكهربائية إلى مسافات بعيدة إلى مستهلكي الطاقة الذين ينتشرون على مساحات واسعة وهذا يتطلب منظومة نقل تحتوي على منظومات نقل ثانوية تعمل بمستويات مختلفة للفولتية. ويوضح الشكل 1-1 العناصر والمكونات الأساسية لمنظومة قدرة حديثة حيث يتم توليد الطاقة الكهربائية في محطات التوليد ومن ثم نقلها إلى المستهلكين من خلال شبكة معقدة من الأجهزة والمعدات التي تشمل خطوط نقل ومحولات قدرة ومعدات فصل وتوصيل.

بصورة عامة يتم تصنيف شبكة النقل إلى المنظومات الثانوية كما يأتي:

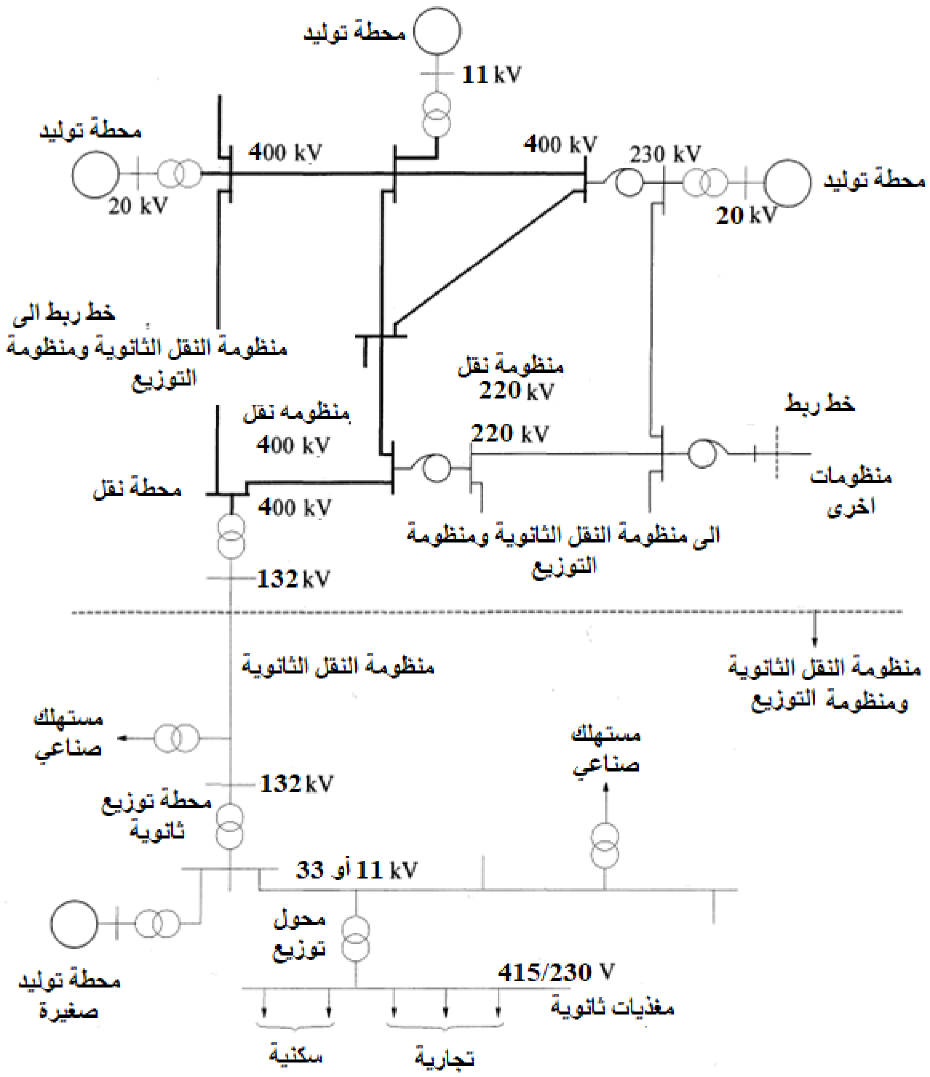
1. منظومة النقل الأساسية Transmission System
2. منظومة النقل الثانوية Sub transmission system
3. منظومة التوزيع Distribution system

منظومة النقل الأساسية: تربط هذه المنظومة جميع محطات التوليد الرئيسية ومراكز الأحمال في منظومة القدرة وتشكل العمود الفقري لها وتعمل بفولتيات عالية جداً (220 كيلو فولت فأعلى) . أما فولتيات المولدات فتتراوح من 11 كيلوفولت إلى 33 كيلو فولت. هذه الفولتيات المتوسطة يتم رفعها عادة إلى مستويات الفولتية الخاصة بالنقل ويتم إرسال القدرة إلى محطات النقل الثانوية التي عندها تخفض الفولتيات إلى مستويات منظومة النقل الثانوية (66 أو 132 كيلو فولت).ويطلق على منظومات التوليد والنقل الثانوية بمنظومة القدرة الجسيمة أو العظيمة Bulk power system .

منظومة النقل الثانوية: تنقل القدرة بكميات صغيرة من محطات النقل الثانوية الى محطات التوزيع الثانوية . وفي العموم يتم تجهيز المستهلكين الصناعيين ومصانعهم بواسطة منظومة النقل الثانوية مباشرة.
منظومة التوزيع : وهي المرحلة الأخيرة من نقل الطاقة التي تنقل القدرة الكهربائية إلى المستهلكين الفرادى بفولتيات 33 كيلو فولت كالجامعات والمعامل الصغيرة والمجمعات التجارية والمولات وغيرها. أما مغذيات التوزيع الثانوية فتجهز القدرة للمجمعات السكنية والتجارية بفولتية منخفضة 230/415.

وتتواجد غالباً محطات توليد صغيرة تبنى بالقرب من الحمل وتربط عادة إلى منظومة النقل الثانوية أو منظومة التوزيع مباشرة.

وبالنسبة للربط الكهربائي بين الدول ومنظومات القدرة الأخرى المجاورة فيتم بمستويات فولتية منظومة النقل حصراً.



الشكل 1-1 العناصر والمكونات الأساسية لمنظومة قدرة كهربائية .

مما مر في أعلاه فإن أية منظومة قدرة كهربائية تكون محتوية على مصادر متعددة لتوليد الطاقة وكذلك العديد من شبكات النقل بمستويات مختلفة من الفولتية وهذه تؤمن درجة عالية من الوفرة للطاقة بحيث تجعل المنظومة قادرة على تفادي الحالات غير الأعتيادية والحوادث غير المتوقعة بدون التأثير

على استمرارية تجهيز الطاقة للمستهلكين. والمتطلبات الأساسية التي يجب أن تؤمنها منظومات القدرة المصممة والتي تعمل بشكل جيد تتلخص بالآتي:

1. يجب أن تكون المنظومة قادرة على تلبية الطلب على التغيير المستمر في الحمل للقدرة الفعالة P والقدرة المتفاعلة Q كليهما. وعلى خلاف الأنواع الأخرى من الطاقة فان الطاقة الكهربائية لا يمكن خزنها بكميات كافية مفيدة، لذلك يجب الحفاض على كمية احتياط دائر Spinning reserve كافية من القدرة الفعالة والقدرة المتفاعلة والتحكم بهما بشكل مناسب في جميع الأوقات.
2. يجب على المنظومة أن تجهز الطاقة بأقل تأثيرممكن على البيئة وبأقل التكاليف .
3. نوعية التجهيز للقدرة يجب أن يطابق متطلبات قياسية معينة وهذه المتطلبات تشمل:

(أ) إستقرار وثبات التردد

(ب) إستقرار وثبات الفولتية

(جـ) أن يكون على قدر كبير من الوثوقية العالية

لتحقيق هذه المتطلبات فانه يتطلب توفير حشد كبير ومعقد من أجهزة السيطرة والتحكم الذاتي ، ويبين الشكل 1-2 منظومة قدرة والمنظومات الثانوية للسيطرة والتحكم الملحقة بها. وتتضمن المنظومات الثانوية للتحكم هذه على أنواع متعددة من المسيطرات Controllers تعمل مباشرة على عناصر ضمن أنظمة منفردة. ويمكن تلخيص أنظمة السيطرة والتحكم في منظومات القدرة كما يأتي :

- السيطرة والتحكم في توليد الطاقة الكهربائية

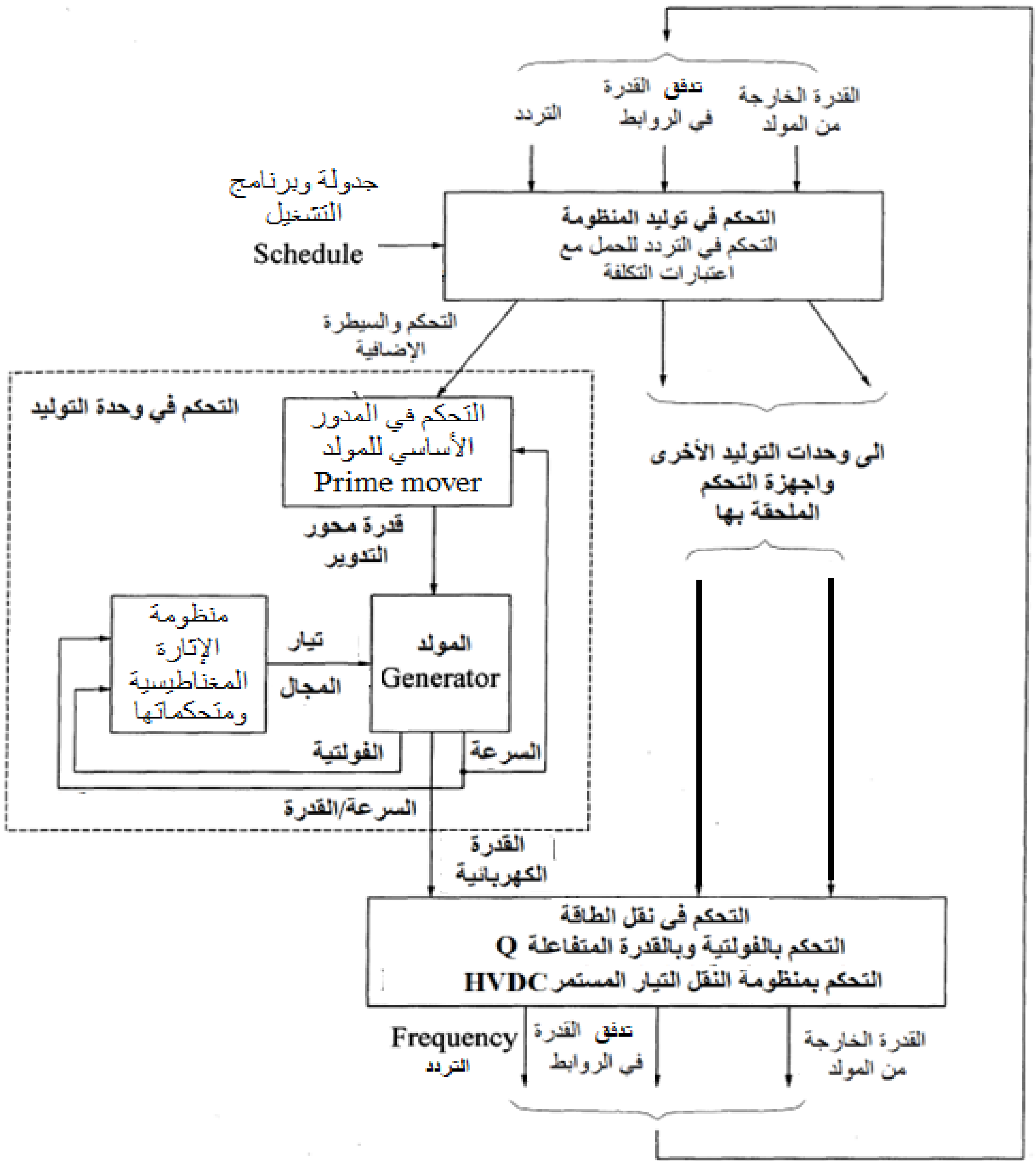
إذا اخذنا مثلاً وحدة توليد متكاملة نجد أنها تتضمن الآتي:

1. نظام سيطرة على سرعة وحدة التدوير الأساسية أو التوربين البخاري أو الغازي المسؤول على تدوير المولد واعطاءه السرعة المطلوبة والتحكم بها ، وكذلك التحكم في تدفق الطاقة الميكانيكية الداخلة للمولد بتنظيم درجة الحرارة والضغط في المراجل وأجهزة التسخين الأخرى.
2. نظام التحكم بدائرة الإثارة المغناطيسية للمولد التي وظيفته هي لتنظيم الفولتية المتولدة والتحكم بكميات القدرة المتفاعلة أيضاً . أما التحكم بالقدرة الفعالة MW المطلوبة لوحدات التوليد كل على حدة فيتم تحديدها بالسيطرة على التوليد في المنظومة ككل.

إن الهدف الأساسي في التحكم والسيطرة على التوليد في المنظومة هو الموازنة بين توليد الطاقة الكلي مع متطلبات الأحمال وكذلك الخسائر والمفاقيد بحيث تتم المحافظة دائماًعلى التردد المطلوب وتبادل تدفق الطاقة فيما بينها وبين المنظومات الأخرى المجاورة عن طريق الروابط والوصيلات Tie flows.

* السيطرة والتحكم في نقل القدرة

السيطرة على نقل القدرة يشمل أجهزة التحكم بالقدرة والفولتية وما يلحق بها مثل معوضات القدرة المتفاعلة الستاتيكية المعروف بالستاتكم STATCOM والمكثفات التزامنية والمتسعات والمفاعلات الحثية وأجهزة التحكم بها ، وكذلك محولات القدرة ذات المآخذ المتغيرة ، والمحولات الخاصة بإزاحة الطوروأجهزة التحكم والسيطرة على منظومات النقل بالتيار المستمر ذات الفولتية العالية HVDC .



الشكل 1-2 المنظومات الثانوية لمنظومة القدرة ووسائل التحكم والسيطرة الملحقة بها.

إن أجهزة ومعدات السيطرة والتحكم التي تم وصفها في أعلاه تساهم جميعها في الإشتغال الجيد المرضي لمنظومة القدرة وذلك بالمحافظة على الفولتية والتردد والمتغيرات الأخرى ضمن حدود القيم المقبولة لها. كذلك تعمل هذه الأجهزة والمعدات على تعميق التأثير في أداء منظومة القدرة الديناميكي وعلى قابليتها للمشاركة في مواجهة الاضطرابات التي تتعرض لها بصورة عامة.

الأهداف المتوخات من وجود أجهزة السيطرة والتحكم في منظومات القدرة تعتمد على حالتها التشغيلية. فعندما تكون المنظومة في حالة اشتغال طبيعي فهنا يكون دور أجهزة السيطرة والتحكم هو تشغيل المنظومة بحيث تكون قيم الفولتية والتردد قريبة جداً من قيمها الطبيعية . وعندما تتعرض المنظومة لظروف غير طبيعية فان الهدف من أجهزة السيطرة والتحكم هي إعادة المنظومة وبأسرع وقت لحالة اشتغالها الطبيعية.

الإخفاقات الرئيسية وفشل المنظومة ككل قلما يتسبب من اضطراب جائح مفرد يؤدي إلى انهيار منظومة مؤمنة بشكل تام ؛ لكن الفشل الكبيروالرئيسي قد يتسبب دائماً بواسطة ظروف سيئة مجتمعة خارج نطاق قابليتها على تحمل هذه الظروف . من هذه الظروف في الطبيعة مثل الأعاصير الشديدة وهبوب الرياح القوية والأمطار التي تحمل الجليد والبرد ؛ كذلك التشغيل السئ للمعدات وأخطاء الأشخاص العاملين والتصميم غير الجيد ، كل هذه العوامل تؤدي إلى اضعاف المنظومة وبالتالي انهيارها الكامل.

1-4 حالات اشتغال منظومة القدرة واستراتيجيات السيطرة والتحكم

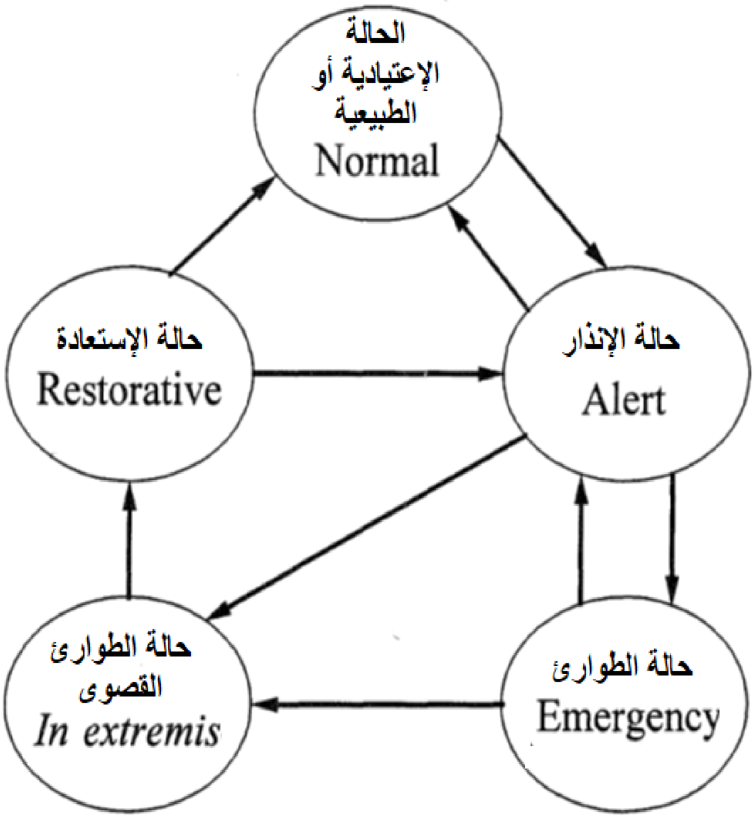
لأغراض تحليل أمن منظومة القدرة وتصميم منظومة سيطرة وتحكم مناسبة ، من المفيد أن نصنف حالات اشتغال المنظومة إلى خمس حالات ، أنظر الشكل 1-3 :

- الحالة الطبيعية الإعتيادية
- حالة التنبيه والإنذار
- حالة الإستعادة أو الإنعاش
- حالة الطوارئ
- حالة الطوارئ القصوى

في الحالة الطبيعية الإعتيادية تكون المتغيرات في المنظومة بحدودها الطبيعية ولا يوجد أي جهاز أو معدة محمل فوق طاقته القصوى (فوق الحمل Overload) . آنئذ تكون المنظومة تعمل بسلوك أو نمط أمين وتكون أيضاً قادرة على مجابهة الحوادث غير المتوقعة أو الطارئة بدون انتهاك أي من القيود والمحددات المطلوبة لتشغيلها الجيد.

وتدخل المنظومة في حالة الإنذارإذا هبط مستوى الأمان فيها دون حدود معينة من الكفاية المقبولة ، أو احتمالية أن الإضطراب يتزايد بسبب سوء الأحوال الجوية مثل هبوب العواصف الشديدة. في هذه الحالة

فإن جميع المتغيرات والقيود في وعلى المنظومة تكون ضمن مديات مقبولة لاشتغالها بشكل مرضي، لكنها بطبيعة الحال ، تكون ضعيفة وعرضة لإحتمال زيادة التحميل مما يسبب دخول المنظومة في الحالة الطارئة تماماً. وإذا كان الاضطراب كبير جداً فستدخل المنظومة في حالة الطوارئ القصوى مباشرة من حالة الإنذار.



الشكل 1-3 حالات اشتغال منظومة القدرة.

هناك إجرآت وقائية قد تتخذ لإعادة المنظومة إلى وضعها الطبيعي مثل المناورة بكمية التوليد أو زيادة الاحتياط في كمية التوليد ، واذا لم تنجح هذه الإجراءات فستبقى المنظومة في حالة الإنذار.

وتدخل المنظومة في حالة الطوارئ اذا حدث اضطراب كبير عليها وهي في حالة الآنذار. في هذه الحالة تهبط الفولتيات في كثير من قضبان التوزيع او يزيد تحميل المعدات والأجهزة على تحملها المقنن الأقصى القصير المسموح به . لكن المنظومة يمكن أن تبقى سليمة وقد تعود إلى حالة الإنذار بواسطة تشغيل أجهزة السيطرة والتحكم الاضطرارية التي تتضمن:

- إزالة الأعطال
- تشغيل سيطرة دائرة الإثارة المغناطيسية للمولدات

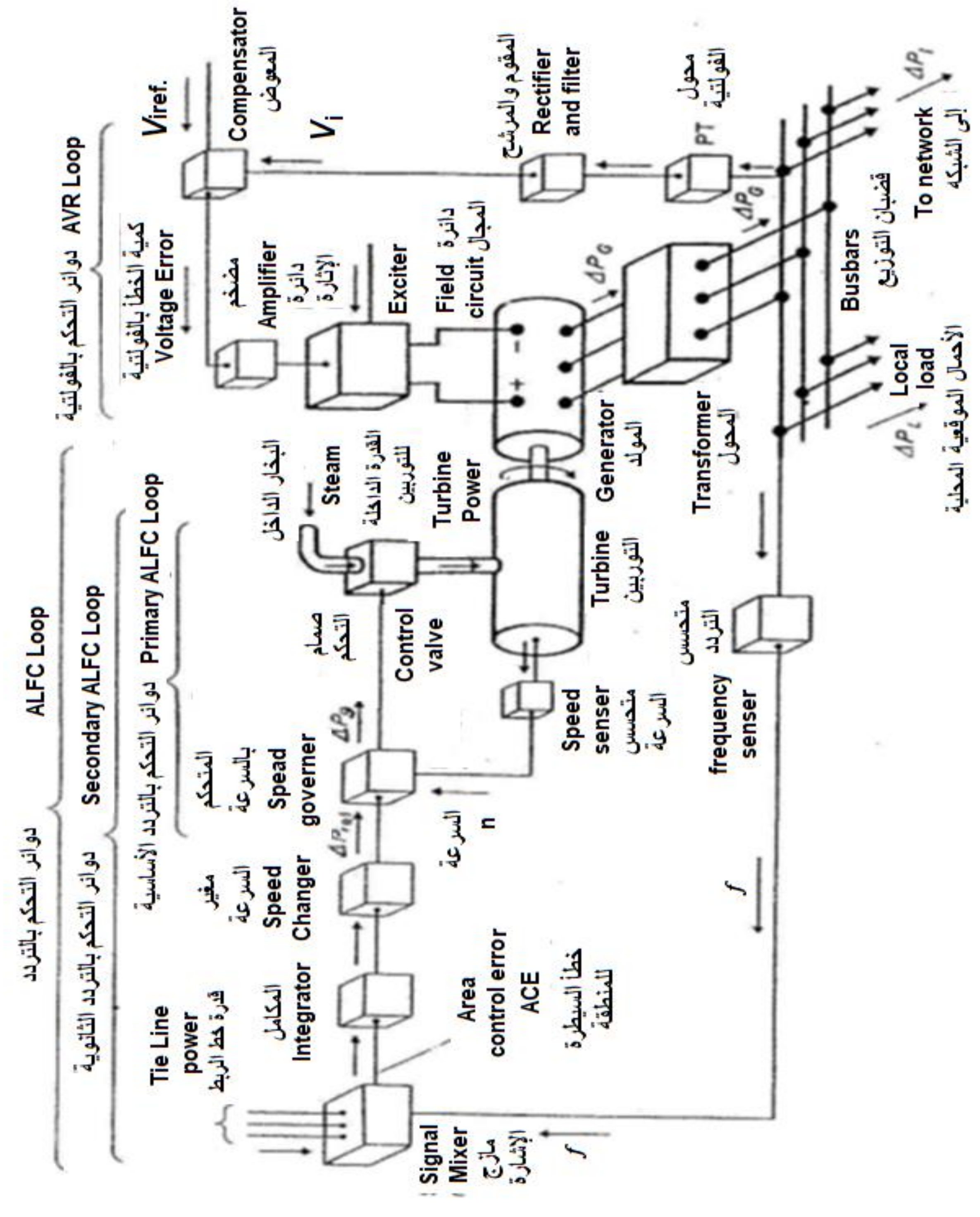
- الفتح أو الإغلاق السريع للصمامات الخاصة بتجهيز الوقود
- فصل وحدات التوليد عن العمل
- فصل بعض الأحمال غير الضرورية

واذا لم تطبق الاجرات أعلاه أو كانت غير كافية فسوف تنتقل المنظومة إلى حالة الطوارئ القصوى وسوف يؤدي ذلك إلى خروج وانهيار متعاقب لأجزاء من المنظومة أو كلها.

أما حالة إستعادة المنظومة فتمثل حالة اشتغال منظومة السيطرة والتحكم لإعادة ربط جميع المرافق التي تعرضت للاضطراب وكذلك إعادة أحمال المنظومة كما كانت عليه، لكن انتقال المنظومة من هذه الحالة إلى أي من حالتي الإنذار أو الحالة الطبيعية يعتمد على ظروف المنظومة نفسها.

إن توصيف ظروف منظومة القدرة بالحالات الخمس السالفة الذكريعطي هيكل عمل الذي من خلاله يتم تطويرستراتيجية للسيطرة والتحكم للعاملين لكي يتمكنوا من التعامل مع الحالات التي تم وصفها في أعلاه.

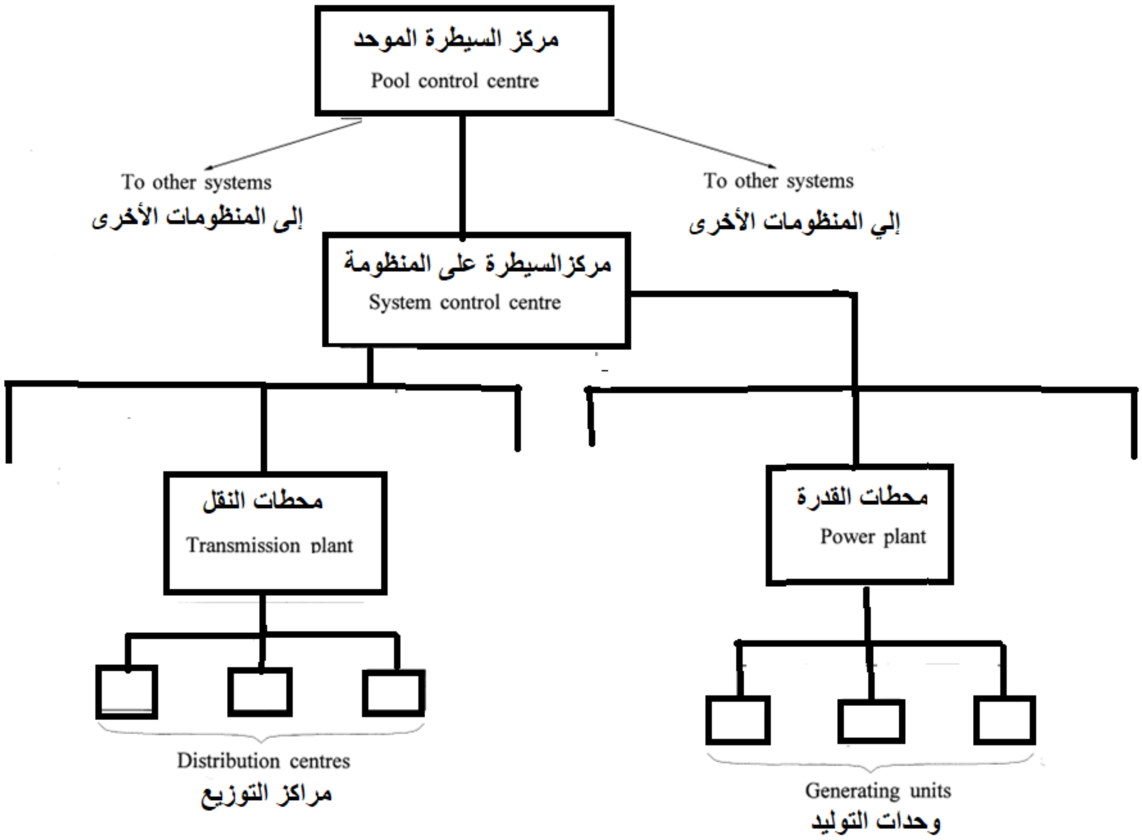
إن الفلسفة المستنبطة للتعامل مع المتطلبات المتنوعة للتحكم والسيطرة لمنظومة القدرة تشمل الترتيب الهيكلي الموضح في الشكل 1-4 . في هذا الترتيب توجد هناك مسيطرات تعمل مباشرة على عناصر خاصة في المنظومة بصورة انفرادية مثل أنظمة الإثارة المغناطيسية ، المدورات الأساسية ، مراجل تسخين البخار ، مآخذ التغيير للفولتية في المحولات ، وكذلك أجهزة تحويل التيار المستمر. على هذا الأساس، فانه لابد ان تكون هناك صيغة تنظيمية للمسيطرات ككل في محطات التوليد لتنظيم السيطرة على العناصر في المحطة المترابطة مع بعضها البعض . هذه المسيطرات بدورها تراقب أو يتم الإشراف عليها بمراكز الإشراف والسيطرة لعموم المنظومة . لذلك فان السيطرة على المنظومة ككل تكون منتشرة وموزعة بصورة هائلة وواسعة ؛ لذلك يتم الإعتماد الكبير على أنواع متعددة من أجهزة القياس ورصد المعلومات والإشارات عن بعد . وتعطي منظومات المراقبة والسيطرة وتجميع البيات المسمات بالـ SCADA جميع المعلومات المتعلقة بحالة المنظومة . وتستخدم برامج خاصة لتقدير حالة المنظومة State estimation لتصفية البيانات المستحصلة وإعطاء صورة صحيحة و مضبوطة عن حالة المنظومة وظروفها. ويكون للأشخاص العاملين في هذه المراكزالأدوار المهمة الأساسية في التعامل مع المستويات المختلفة والمتعددة للهيكل التنظيمي الهرمي للمسيطرات هذه حيث تكون الوظيفة الأساسية لهؤلاء العاملين هو مراقبة أداء المنظومة وإدارة المصادر لتأمين تشغيل اقتصادي بالنوعية الجيدة والوثوقية المطلوبين لتأمين استمرارية تجهيز الطاقة وعدم انقطاعها المستمر.أنظر الشكل 1-5 الذي يعطي الهيكل التنظيمي الهرمي لمراكز السيطرة والتحكم الوطنية لعموم منظومات القدرة المترابطة مع بعضها.



الشكل 1-4 رسم تخطيطي لدوائر السيطرة والتحكم بالفولتية والتردد لمولد يعمل بطاقة البخار.

ومع ان بعض التحسينات التي تم تطويرها لإستمرارية التجهيز من خلال الأستعمال الكبير لقواطع الدورة الذاتية المعيدة للغلق وكذلك استخدام الحاسبات في مراكز السيطرة الرئيسية والمحطات

الكبيرة فقد أدى التطور في تصاميم مشاريع توليد ونقل وتوزيع الطاقة إلى اظهار المستوى العالي لتحقيق استمرارية التجهيز باقتصاد عال. لذا فان التقنية المتقدمة يمكن أن تستغل لتحقق أعظم كسب في مجمل النواحي الأقتصادية وافضل امثلة للتفاعل بين تصميم اجزاء مختلفة من الوحدات والمعدات تقع في مضمار استقرارية المنظومة التي تكون معتمدة على عدد كبير من العوامل.



الشكل 1-5 الهيكل التنظيمي الهرمي لمراكز السيطرة والتحكم الوطنية لعموم منظومات القدرة المترابطة مع بعضها.

1-5 التصاميم والمعاييرالمطلوبة لضمان التشغيل المستقرلمنظومات القدرة

لضمان التشغيل المستقر والخدمة عالية الوثوقية لمنظومات القدرة الكبيرة يجب أن تبقى هذه المنظومة سليمة وقادرة على مجابهة الظروف غير الطبيعية المحتملة ومجابهة الإضطرابات الكبيرة المختلفة التي تتعرض لها. لذلك فمن الضروري جداً أن تصمم المنظومة وتشغل بحيث تبقى مقاومة للظروف غير الطبيعية والأحداث غير المتوقعة التي تتعرض لها (عدا تلك المتعلقة بعطل الأجهزة والمعدات) وكذلك

بحيث أن الأحداث غير المتوقعة القاسية هذه لا تؤدي إلى انقطاعات كبيرة ومتعاقبة بسبب عدم الإمكانية على السيطرة والخروج المتعاقب لوحدات التوليد في المنظومة.

وتلعب معايير التصميم والتشغيل دوراً أساسياً في منع حدوث الإضطرابات الكبيرة للمنظومة التي تتبع أحداث غير متوقعة قاسية متكررة بحيث تنتقل حالة المنظومة من الحالة الطبيعية إلى حالة الإنذار في الأقل بدلاً من أن تنتقل إلى الحالات السيئة جداً مثل حالة الطوارئ أو حالة الطوارئ القصوى. وإذا دخلت المنظومة في حالة الإنذار التي تتبع تعرضها لأحداث غير متوقعة فإن العاملين المشغلين باستطاعتهم اتخاذ الإجرآت المناسبة لأعادة المنظومة إلى حالتها الطبيعية. ومن الأمثلة على معايير التصميم والتشغيل المرتبطة باستقرارية منظومة القدرة ندرج في ادناه أنواع الحالات غير المتوقعة التي قد تؤخذ بعين الإعتبار كمؤشر لتقييم استقرارية المنظومة .

1. الأعطال الثلاثية الطور الدائمية التي تحدث على المولدات وخطوط النقل والمحولات وقضبان التوزيع والتي تتم إزالتها بصورة اعتيادية .
2. أعطال الطور- إلى – الأرض الدائمية التي تحدث في وقت واحد على أطوار مختلفة بين دائرتي نقل قدرة متجاورتين على برج نقل متعدد الدوائر والتي تتم ازالتها بوقت طبيعي.
3. عطل طور- إلى – الأرض الدائم التي تحدث على دائرة نقل قدرة أو محول أو قضيب توزيع والتي تتم ازالتها بوقت متأخر بسبب عدم الإشتغال الجيد لقواطع الدائرة أو مرحلات الحماية أو بسبب سوء إرسال إشارات أجهزة الحماية.
4. فقدان أي عنصر من المنظومة بدون أن يكون سببه حدوث عطل.
5. حدوث عطل طور- إلى – الأرض مستمر على قاطع دائرة يزال في وقت طبيعي بدون تأخير زمني.

إن المعايير تتطلب أنه إذا حدث أي من الأمور غير الإعتيادية المذكورة في أعلاه ، يجب الإبقاء على استقرارية المنظومة بأي شكل من الأشكال ، وكذلك يجب أن يبقى تحميل الخطوط والمعدات والفولتيات ضمن الحدود التشغيلية لها قدر الإمكان. هذه المتطلبات تطبق عند شرط أساسي هو أن جميع المرافق العاملة في المنظومة يجب أن تكون في الخدمة.

1-6 تقييم الأحداث غير الإعتيادية المتطرفة Extreme contingency assessment

إن تقييم الأحداث غير الإعتيادية المتطرفة هدفه التعرف على الأحداث غير الإعتيادية التي تتعرض لها منظومة قدرة كبيرة مترابطة تَتعدى بقساوتها الأحداث الطبيعية التي صممت عليها أصلاً ،

وذلك لتحديد تأثيرهذه الأحداث غير الإعتيادية المفرطة على أداء المنظومة وبيان صلابتها لمجابهة مثل هذه الإضطرابات الشاملة حتى وإن كان احتمال وقوعها ضئيل جداً.

من الأمثلة على الأحداث غير الإعتيادية المتطرفة :

- فقدان القدرة على التوليد بصورة كلية لمحطة توليد ضمن المنظومة .
- فقدان جميع خطوط النقل المنبثقة من محطة توليد أو محطة توصيل وفصل أو محطة ثانوية.
- وقوع عطل ثلاثي الطور دائمي على مولد أوخط نقل أومحول أوقضبان توزيع والتي تتم إزالته بوقت متأخر.
- الإسقاط المفاجئ لحمل كبير أو مركز أحمال رئيسي.
- التأثير الناتج عن تأرجح القدرة المتسبب عن الإضطرابات خارج المنظومة الأساسية المرتبطة بالمنظومات الأخرى.
- فشل أجهزة الحماية للمولدات والأجهزة والمعدات الأخرى .

1-7 تصميم منظومة القدرة لضمان استقراريتها

يعد تصميم منظومة قدرة كبيرة ومترابطة لضمان استقراريتها بالكلفة الإقتصادية الدنيا هو من المسائل المعقدة جداً. الربح الأقتصادي من حل هذه المعضلة يكون ضخم جداً. فمن وجهة نظر نظرية السيطرة والتحكم فإن منظومة القدرة تعد كونها حشد من العمليات متعددة المتغيرات ذات مرتبة عالية تشتغل تحت ظروف متغيرة باستمرار. وبسبب كون المنظومة ذات أبعاد شاسعة وتعقيد بنائي كبير فمن الضروري عمل فرضيات لتبسيطها وتحليل مسائل معينة باستعمال الدرجة الصحيحة لتفاصيل تمثيلها حيث يتطلب ذلك الفهم العميق لخصائص المنظومة إضافة إلى مكوناتها وعناصرها الأساسية.

إن منظومة القدرة هي منظومة عالية الدرجة من اللاخطية التي يتأثر أداءها الديناميكي بحشد من الأجهزة ذات خصائص وإستجابات و ردود أفعال مختلفة ، لذلك فان استقرارية المنظومة يجب أن لا تنظر وكأنها مسألة مفردة ولكن يجب النظر اليها من جوانب متعددة.

الفصل 2 مقدمة لموضوع إستقرارية منظومة القدرة

2-1 مقدمة

يعرض هذا الفصل مقدمة عامة لموضوع إستقراية منظومة القدرة متضمناً المفاهيم الأساسية لها، كيفية تصنيفها وتعاريف المصطلحات الخاصة بها. إن تحليل منظومة قدرة بسيطة بواسطة تمثيل مكوناتها الأساسية بواسطة النماذج المبسطة المثالية يعطي توضيحاً لشيء من الخصائص الأساسية لإستقرارية منظومات القدرة بصورة بسيطة.

يتم اختيار الاستقرار من قبل متطلبات الحد من الاستقرار أو نوعية الطاقة الكهربائية في ظل حالة مستقرة أو أثناء حالة عابرة. ويشير الحد الثابت للحالة إلى الحد الأقصى لتدفق الطاقة عبر نقطة معينة دون التسبب في فقدان الاستقرار عند زيادة الطاقة تدريجياً.

2-2 المفاهيم والتعاريف الأساسية

تعرّف الاستقرارية للمنظومة الكهربائيةPower System Stability بأنها قدرة المنظومة على العودة لحالتها الطبيعية واشتغالها المستقر بعد تعرضها لشكل من أشكال الاضطراب. أو تعرف بشكل أوسع كونها تلك الخاصية لمنظومة القدرة التي تمكنها للبقاء في حالة اشتغال متوازن تحت الظروف الطبيعية وتستعيد حالة توازن مقبولة بعد تعرضها لإضطراب. ومن الناحية التقليدية فقد فكانت مسألة الإستقرارية تعرف كونها تلك of الخاصية التي تحافظ على إبقاء منظومة القدرة في حالة تزامن.

أما حالة عدم الاستقرارية of Power System Instability لمنظومة القدرة فتتجلى بطرق كثيرة اعتماداً على الترتيب الشكلي أو التكويني للمنظومة. وتقليدياً فهي تعني الإشارة إلى الظرف الذي تفقد فيه منظومة التوليد حالة التزامن Loss of synchronism أو تخرج فيه عن حالة الاستقرار Falling out of step.

والاضطرابات التي تهدد استقرار المنظومة تكون على أنواع مختلفة، لكنها في دراسات الاستقرارية تصنف بنوعين أساسيين :

- الإضطرابات الصغيرة
- الإضطرابات الكبيرة

تتميز الإضطرابات الصغيرة بكونها تحدث تغييراً بسيطاً في حالة المنظومة . مثال على ذلك حدوث تغيرات عشوائية مستمرة في الحمل في المنظومة، ومشاكل الإستقرارية التي تتضمن الاضطرابات البسيطة يطلق عليها عادة "الإستقرارية الديناميكية أو الحركية Dynamic stability".

أما الإضطرابات الكبيرة فان منظومة القدرة قد تتعرض إلى اضطراب كبير عندما:

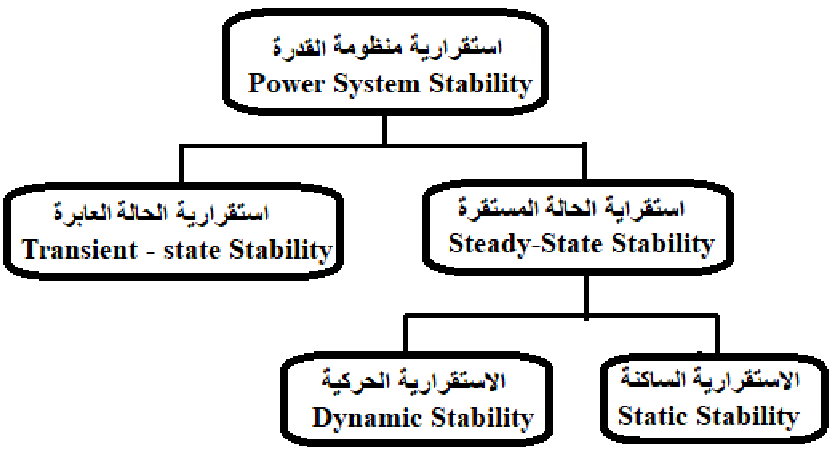
- تحدث أعطال على خطوط النقل
- خروج وحدات توليد كبيرة عن العمل
- خروج مرافق نقل رئيسية عن العمل
- فقدان أحمال كبيرة

ونتيجة هذه الإضطرابات سوف يحدث تأرجح أو تذبذب في الطاقة في عموم المنظومة بين المتسعات C والمحاثات L وبين الكتل الدوارة ، وهذا العامل الأخير هو الأكثر أهمية ، وكذلك في مراجل البخار في محطات التوليد أو غرف الإحتراق نفسها. ويظهر ذلك جلياً في التغيرات في القدرة الفعالة P والقدرة المتفاعلة Q والفولتية V والتيار I.

1-2-2 أنواع الاستقرارية

من المعتاد في دراسات الإستقرارية لمنظومات القدرة أن تصنف الإستقرارية إلى نوعين أساسيين تبعاً لطبيعة وطول فترة الإضطراب وفق المخطط المبين في الشكل 2-1، وهي:

1- إستقرارية الحالة الثابتة (المستقرة) Steady-state stability.
2- إستقرارية الحالة العابرة Transient stability .



الشكل 2-1 تصنيف أنواع الإستقرارية من الناحية العملية.

2-2-2 إستقرارية الحالة الثابتة (المستقرة)

تكون لمنظومة القدرة المتزامنة إستقرارية حالة ثابتة (مستقرة) إذا أستطاعت مكائن توليد القدرة فيها إستعادة السرعة التزامنية والمحافظة عليها بعد حصول إضطراب صغير وبطيء. والإضطراب المتغير الصغير والبطيء يعني تقلبات الحمل الإعتيادي بضمنه تأثيرات منظمات الفولتية الذاتية والمتحكمات في سرع التوربينات وتدفق البخار أو الوقود اليها . وإستقرارية الحالة الثابتة تحدد إستقرار المنظومة، كذلك تعرف بقدرة المنظومة على مقاومة الإضطرابات الصغيرة التي تحاول تغيير متغيرات التشغيل عنها في الحالة الطبيعية. وتقسم إلى :

- إستقرارية الحالة الساكنة : تفحص إستقرار النظام تحت زيادة صغيرة متغيرة في المحددات أو شروط التشغيل.
- إستقرارية الحالة الديناميكية : إن الحالة الديناميكية لمنظومة القدرة تتمثل بتعرض ماكنة توليد واحدة أو عدد قليل من المكائن لتغيرات سريعة و مفاجئة في شروط تشغيل. ومشاكل الإستقرارية التي تتضمن مثل هذه الإضطرابات البسيطة يطلق عليها الإستقرارية الديناميكية أو الحركية Dynamic stability.

إن التمييز بين الحالة الساكنة و الديناميكية هو عملياً إصطناعي، طالما أن مشاكل الإستقرار هي نفسها في الحقيقة، و تختلفان فقط في دقة تمثيل نموذج الماكنة . ففي الحالة الديناميكية يتم تمثيل نظام الإثارة و حاكمة التوربين في النظام، إذ تؤمن الحالة الديناميكية التغير في تسرب الفيض في الفجوة الهوائية للماكنة. بينما الحالة الساكنة تستخدم نموذج سهل جدا حيث تعتبر ماكنة التوليد مصدراً ثابتاً للفولتية.

2-2-3 إستقرارية الحالة العابرة

تكون لمنظومة القدرة إستقرارية عابرة إذا استطاعت استعادة السرعة التزامنية والمحافظة عليها بعد إضطراب كبير مفاجيء . الإضطراب الكبير المفاجيء هو ذلك الإضطراب الذي تسببه الأعطال وعمليات الغلق والفتح Switching operations. وتعطي تحليلات الحالة العابرة بصورة خاصة درجة استقرار منظومة القدرة في حالة تعرضها لإضطرابات عديدة و مفاجئة. ومن أجل تطبيق هذا التعريف يجب أن توصف المنظومة بمعادلات تفاضلية التي تكون عادة لاخطية Non-linear differential equations. هذه الإضطرابات إما أن تكون بسيطة مثل التغيرات المستمرة في الأحمال بحيث تقوم المنظومة بضبط نفسها للظروف المتغيرة الجديدة وتعمل بنجاح تحت الظروف المستجدة لتجهيزأعظم كمية من القدرة الكهربائية المنتقلة من المولدات إلى الأحمال. كذلك يجب أن تكون المنظومة قادرة على التلائم مع الإضطرابات العديدة ذات الطابع القاسي والقاسي جداً مثل:

1-أخطاء التحكم في أنظمة وخطوط النقل أو وقوع أعطال قصر الدائرة عليها.

2- فقدان مفاجئ للأحمال الكبيرة.

3- خروج وحدات توليد كبيرة.

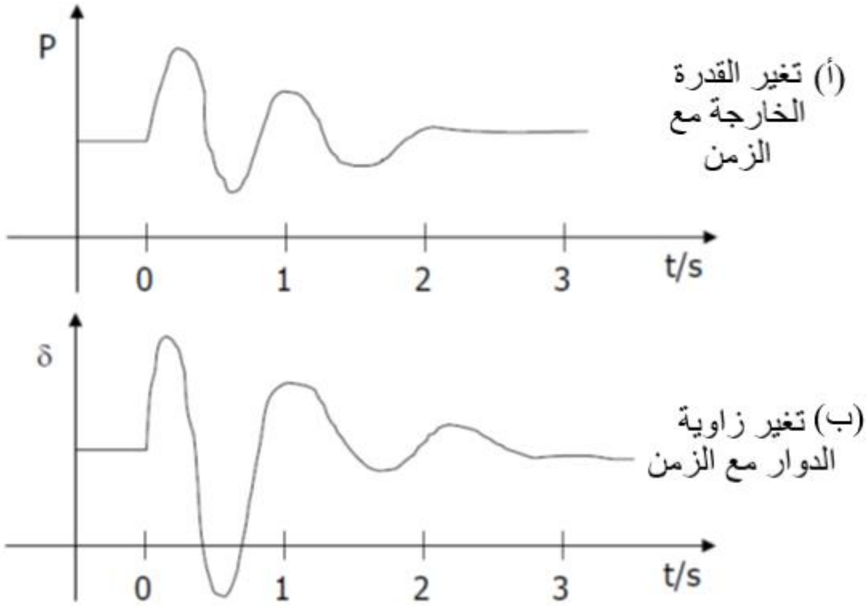
4- فقدان خطوط الربط بين منظومات النقل الثانوية.

إن رد فعل المنظومة لهذه الإضطرابات سيتضمن التأثير على عدد كبير من الأجهزة والمعدات ، فمثلاً عند وقوع عطل قصر على أحد العناصر المهمة المتبوع بازالته بواسطة مرحلات الحماية سوف يؤدي إلى تغيير في إنتقال القدرة وتغيير في سرعة دوار ماكنة التوليد وكذلك تغيير في الفولتية . والتغير بالفولتية سوف يحفز منظمات الفولتية وخطوط النقل كليهما. أما التغير في السرعة فسوف يحفز متحكم سرعة التوربين مما يؤدي إلى حصول تغيير في الفولتية والتردد كليهما واللذين بدورهما سيأثران على الأحمال المربوطة إلى المنظومة بمقادير تعتمد على خصائص الأحمال نفسها كل على حدة .

إن الدراسات الخاصة بالإستقرارية العابرة تتم عادة في زمن لا يتجاوز الثانية الواحدة. وتنفذ باستخدام الحاسبات الألكترونية إذا كانت المنظومة كبيرة وقد تتم الحسابات بصورة يدوية للحالات البسيطة.

في الدراسات السابقة كانت الإستقرارية الديناميكية تشير إلى حالة الإستقرارية العابرة عندما تكون منظمات الفولتية والمتحكمات بالسرعة سريعة الاشتغال وتؤخذ في الإعتبار في التحليلات . فبعد حدوث عطل ما قد تبقى ماكنة تزامنية مفردة في حالة التزامن خلال التأرجح الأول الناتج عن هذا العطل الذي بعده قد تحدث تذبذبات كهروميكانيكة. هذه التذبذبات قد تؤدي بالمنظومة إلى حصول تذبذب طبيعي لها وتصبح في حالة تذبذب ديناميكي ويقال عنها انها في استقرارحركي Dynamically stable إذا لم تتعدى التذبذبات اتساع معين بحيث تتضائل وتخمد بسرعة. وتتم دراسات الإستقرارية الديناميكية عادة خلال فترة من 5 الى 10 ثواني وفي بعض الأحيان قد تطول إلى 30 ثانية. أنظر الشكل 2-2 .

إن مصطلح الإستقرارية الديناميكية تم استخدامه بصورة واسعة في الدراسات والمراجع والأدبيات كنوع من أنواع إسقرارية زاوية الدوار Rotor angle stability التي سنأتي على شرحها لاحقاً. على أية حال، فقد استخدم هذا المصطلح من قبل عدد من المؤلفين ليشير إلى جوانب مختلفة من الظواهر الغريبة والأحداث غير الإعتيادية . ففي أدبيات شمال أميركا فقد استخدم هذا المصطلح للإشارة إلى إستقرارية الإشارة الصغيرة Small-signal stability بوجود أجهزة السيطرة التلقائية (بالأخص منظمات الفولتية للمولدات) كاختلاف واضح عن إستقرارية الحالة الثابتة المستقرة التقليدية في غياب السيطرة التلقائية. وفي الأدبيات الفرنسية والألمانية استخدم مصطلح الإستقرارية الديناميكية للتعبير عن الإستقرارية العابرة. ولما كان استخدام مصطلح الإستقرارية الديناميكية يحدث إرباكاً كبيراً، لذلك فإن كلا المنظمتين الأميركيتين IEEE و CIGRE أوصتا بعدم استخدامه، إلا أنه في أدبيات الدول الأوربية والعربية لا زال استخدامه قائماً.



الشكل 2-1إستقرارية ديناميكية عند تعرض المنظومة لإضطراب بسيط .

2-3 التصنيف الحديث لإستقرارية منظومة القدرة

تصنف إستقرارية منظومة القدرة تبعاً لعاملين :

- القوة المؤثرة على عدم الإستقرار
- مجال الزمن

ويشار إلى القوة المؤثرة على عدم الإستقرار بكونها تأثير كل من الحمل و التوليد، ويقسم مجال الزمن إلى مدة قصيرة و مدة طويلة . أما فئات الإستقرارية في التطبيقات العملية فهي كما موضحة في المخطط المبين في الشكل 2-3:

1- إستقرارية زاوية العضو الدوار في المولدات Rotor angle stability:

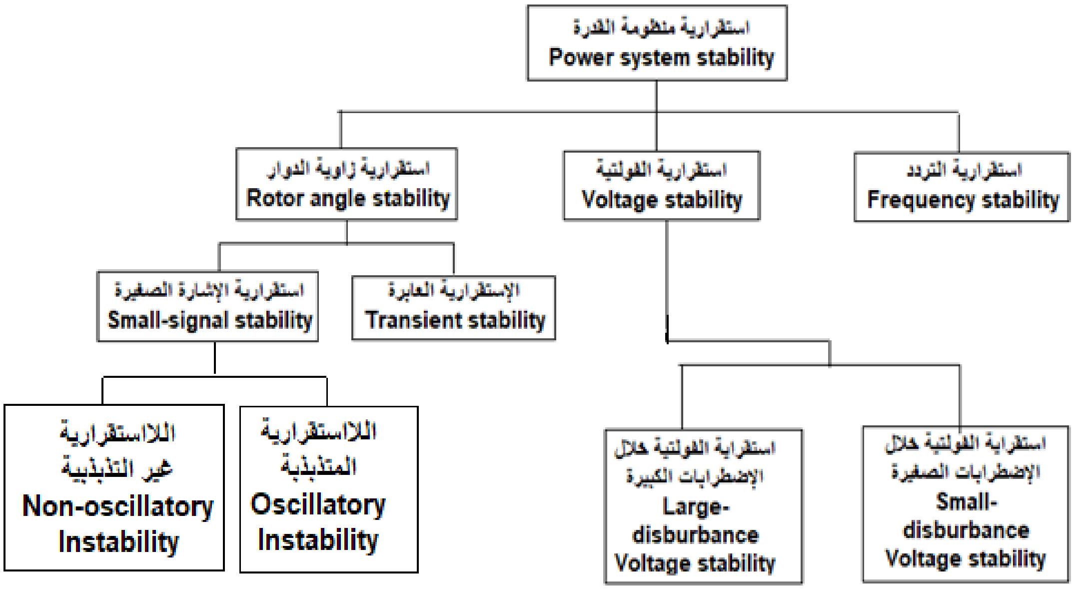
ويشار إليها ايضاً بفقدان التزامن Loss of synchronism ؛ وتحدث عندما يصبح الفرق في قيم زوايا الحمل للمولدات كبير جداً مما يسبب فصل المولدات عن العمل .

2- إستقرارية الفولتية أو إستقرار الجهد Voltage stability:

تشير إستقرارية الفولتية إلى قدرة المنظومة على المحافظة على ثبات الفولتية في جميع قضبان التوزيع فيها بعد تعرضها لحالة إضطراب. وإنهيار الفولتية يجعل اشتغال الترابط بين المنظومات امراً مستحيلاً.

3- استقرارية التردد Frequency stability:

وتشير إلى قدرة المنظومة على المحافظة على ثبات التردد في جميع قضبان التوزيع فيها بعد تعرضها لحالة اضطراب. وانهيار التردد يجعل اشتغال الترابط بين المنظومات أمراً مستحيلاً أيضاً.



الشكل 2-3 التصنيف الحديث لإستقرارية منظومة القدرة الكهربائية.

2-4 تقييم الأعطال في دراسة حالات الإستقرارية

ألأعطال التالية تكون مهمة في دراسات الإستقرارية :

- عطل ثلاثي الطور على أي من خطوط النقل متبوعاً بإعادة الغلق التلقائي السريع الناجح.
- عطل احادي الطور على أي من الخطوط متبوعاً بإعادة غلق تلقائي سريع فاشل.
- عطل ثلاثي الطور على أي من قضبان التوزيع متبوعاً بعزل القضيب وفصله.

وتكون الحالة مقبولة عندما:

- إذا لم تفقد الشبكة حالة التزامن خلال التذبذب (التأرجح) الذي يحصل بعد العطل.
- هبوط قيمة الفولتية في شبكة 400 كيلو فولت الى 370 كيلو فولت في جميع المحطات بعد حصول تذبذب متضائل بسبب عطل.
- إذا لم تتعرض أي من مكونات الشبكة إلى تحميل زائد دائم .
- إذا لم تؤدي الأعطال المنفردة إلى اضطرابات توسعية .

- إذا لم يهبط التردد إلى أقل من 48.5 هرتز بحيث يؤدي ذلك إلى اشتغال معدات الحماية لفصل الأحمال.
- إذا لم يزداد التردد إلى أكثر من 51.5 هرتز.

ويبن الجدول 2-1 حماية منظومة القدرة وانماط التشغيل لها عندما يحصل فيها عجز بسبب تغير التردد.

الجدول 2-1 حماية منظومة القدرة عندما يحصل فيها عجز بسبب تغييرفي التردد.

التردد	فترة التشغيل	نمط التشغيل
49.9 Hz		تحفيز جميع متحكمات التردد الإحتياطية للاشتغال
49.5 Hz		تشغيل جميع احتياط التوليد الدائر
48.7 Hz 48.5 Hz	20 s 0.15 s	الخطوة الأولى : عزل 10% من الحمل
48.5 Hz 48.3 Hz	20 s 0.15 s	الخطوة الثانية: عزل 10% من الحمل
47.8 Hz		إنشاء مناطق موقعية والخطوة الثالثة فصل أحمال هذه المناطق بالتدريج
47.5 ... 47.0 Hz		فصل جميع محطات التوليد

كذلك يبين الشكل 2-4 الإجراءات التي يجب اتخاذها من قبل المشغلين لحماية منظومة القدرة عند انخفاظ أو زيادة في مقدار التردد للمنظومة .



الشكل 2-4.

2-5 انزلاق القطب Pole-slipping

يقصد بانزلاق القطب هو عندما تتجاوز زاوية الحمل δ بين المولد وقضيب التوزيع اللانهائي المربوط إليه $360°$. ويحدث هذا خلال حدوث عطل في المنظومة وخصاصة عندما يكون العطل قريبا من أطراف المولد ويكون أيضاً عرضة للحدوث نتيجة للغلق والفتح المتكرر للمغذي الرابط بين موقع التوليد وقضيب التوزيع اللانهائي .

عند الحاجة إلى فصل أي من خطوط الخدمة الناقلة للقدرة الكهربائية ، فمن المعتاد تقليل الحمل الذي ينقله ذلك الخط إلى أقل كمية ممكنة قبل فتح قواطع الدائرة . من ناحية ثانية فانه إذا أنفصل أحد الخطوط نتيجة للتحميل المفرط فان الانتقال المفاجيء للحمل إلى الخطوط المجاورة سيولد حالات عابرة ثم تأرجحات قدرة بين مجاميع المولدات نفسها. وإذا ازدادت هذه التأرجحات في قيمة ذروتها (أي أن المنظومة تصبح غير مستقرة) فانه سيحصل انزلاق قطب لمولد أو أكثر ، وكلما مرت δ خلال الزاوية $360°$ فان المولد قد يسترجع تزامنه أو لايسترجعه اعتماداً على سرعة الدوار . واذا كانت سرعة الإنزلاق عالية بما فيه الكفاية فانه من المحتمل حدوث عدة انزلاقات قطب متعاقبة متعددة.

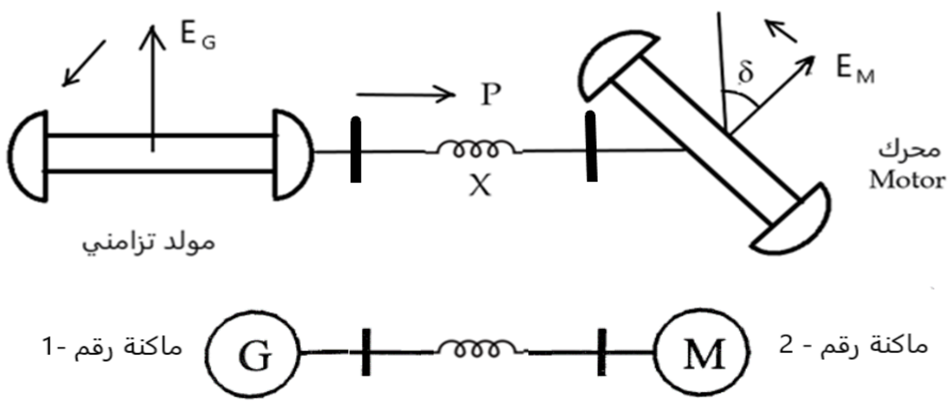
إن انزلاقات القطب المتعددة في منظومة القدرة لايسمح بحدوثها بأي حال من الأحوال في معظم منظومات القدرة في بلدان العالم ؛ لأنه خلال انزلاق القطب سيولد تيار الاثارة المغناطيسية للمولدات تقلبات واضحة ذات قيمة مؤثرة في تيار وفولتية الساكن . وهناك أيضاً خطر لأحتمال انفصال المغذيات المساعدة في المحطة نفسها نتيجة للفولتية المتولدة المنخفضة غير الكافية . وهكذا فان المولد ينفصل عادة من المنظومة اذا حصل له انزلاق لقطبه أكثرمن مرة خلال فترة معينة من الزمن . ويتم الكشف عن انزلاق القطب عادة بوساطة مرحل حماية يسمى مرحل حماية ضد انعكاس اتجاه القدرة حيث يقوم هذا المرحل بتشغيل جهاز توقيت ويصمم جهاز التوقيت هذا لكي يعود إلى وضعه الطبيعي بعد فترة معينة من الزمن (حوالي 30 ثانية عادة) لكنه إذا تم كشف انزلاق قطب ثان قبل إعادة جهاز التوقيت إلى وضعه الطبيعي فانه سيتم فصل المولد عن الخدمة.

قد تنشأ بعض المشاكل بسبب هذا الترتيب . فقد بينت اختبارات حديثة أن جريان القدرة في المولد ليس من الضروري أن ينعكس خلال انزلاق القطب ، هذا بسبب فعل المولد الحثي الذي سيحصل نتيجة للتيارات الدوامية المتولدة في هيكل الدوار الحديدي . وتحت ظروف معينة وخصوصا عندما تكون الأثارة المغناطيسية منخفضة فمن الممكن أن ينزلق قطب المكائن بصورة بطيئة جداً وقد يأخذ عدة دقائق لتكملة دورة أنزلاق واحدة وهذا يجعل تنظيم ومعايرة الحماية صعب جدً . من جهة اخرى فان من حسن الخط أن انزلاقات القطب البطيئة تسبب إضطرابات في المنظومة أصغر بكثير من تلك التي تكون بسبب إنزلاقات القطب السريعة .

إن انزلاق القطب يولد كذلك تأثيرات غير مرغوب فيها في منظومة الأثارة . فخلال إنزلاق القطب تتولد تيارات كبيرة جداً في ملفات الدوار عند اقتراب زاوية الحمل من قيمة 180 درجة والزواياً الأكبرمنها فإن تيارالدوار يتناقص بصورة حادة للمحافظة على توازن الـ ق .د مغ بين ملفات الدوار والساكن . ففي منظومات الإثارة المغناطيسية للمولدات التي تستعمل المقومات الألكترونية المحكومة الحديثة (نبائط ألكترونيات القدرة مثل الثايرستورات أو الترانسستورات ذات القدرة العالية) لايمكن لتيار الدوار أن ينعكس خلالها، لذلك عندما يقل تيار الدوار إلى الصفر ويحاول تغيير إتجاهه فانه لايمكن أن يستمر بالمحافظة على توازن الـ ق.د.مغ . لذلك سيحصل تغيرحاد في الفيض ، وهذا سيتسبب في نشوء فولتية معاكسة كبيرة عبر المقومات قد تتسبب في عطبها إذا لم تكن هذه المقومات ذات تقنين مناسب يستطيع تحمل قيمة التيار المنعكس. لذلك من المهم أن نتوقع حدوث فولتيات محتثة معاكسة خلال ظروف انزلاق القطب . وبما أن جسم الدوار الحديدي يعمل عمل ملفات إخماد تنشأ فيها تيارات متولدة تساعد على المحافظة على توازن الـ ق.د.مغ ، فان الفولتيات المتولدة ستكون أقل مما هي عليه في حالة عدم جريان تيارات في جسم الدوار نفسه.

2-6 قدرة التزامن Synchronizing power

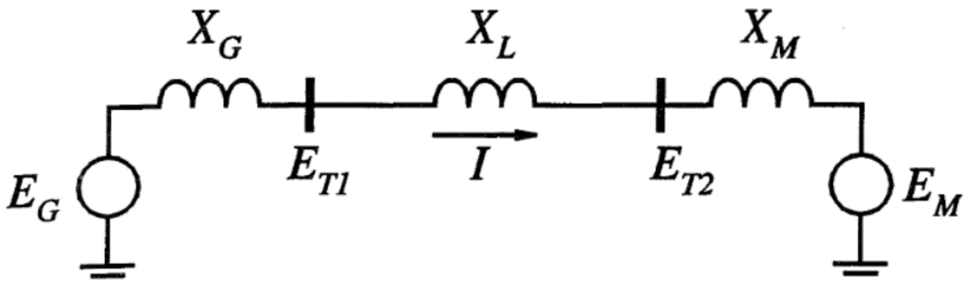
تأمل الشكل 2-5 الذي يمثل ماكنتين أحدهما مولد تزامني والأخرى محرك تزامني أيضاً مربوطتان إلى بعضهما بواسطة خط وصيل مفاعلته X وان تدفق القدرة يكون من المولد إلى المحرك.



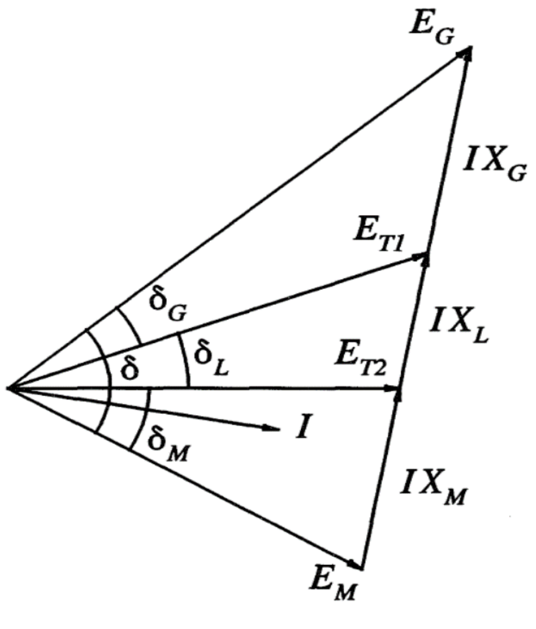
الشكل 2-5 .

الآن إذا ازداد الحمل على المحرك فان سرعته تبدأ بالتباطؤ وهذا يؤدي إلى إزدياد قيمة زاوية القدرة δ . ولأجل تأمين إستقرارية هذه المنظومة يجب أن تكون زاوية القدرة لها القابلية على الزيادة لكي يسحب

المحرك كمية أكبر من القدرة ليبقى في حالة تزامن مع المولد . والشكل 2-6 يوضح الدائرة المكافئة للماكنتين في الشكل 2-5 ألسالف. كذلك يعطي الشكل 2-7 المخطط الطوري للماكنتين المذكورتين.



الشكل 2-6 الدائرة المكافئة للماكنتين في الشكل 2-5 .



الشكل 2-7 المخطط الطوري للماكنتين في الشكل 2-6.

حيث $X = X_G + X_L + X_M$

وكذلك $\delta = \delta_G + \delta_L + \delta_M$

خلال الفترة الزمنية للحالة العابرة ، تكون مدخلات القدرة الكهربائية للمحرك أقل من الحمل الميكانيكي، ويتم توفير القدرة الزائدة المطلوبة بواسطة الطاقة المخزنة في دوار الماكنة. ويتأرجح المحرك

حول نقطة التوازن وقد يؤول في النهاية إما للإستقرار أو فقدان التزامن. كما قد تفقد المنظومة ثباتها عند تسليط حمل كبير أو عند تسليط حمل بشكل مفاجئ على محور العزم الميكانيكي للمحرك.

إن الفرق بين قدرة المحرك وقدرة المولد المتطورة تبعاً لأي قيمة δ تساوي خسائر الخط الذي يربط بين الماكنتين. فإذا كانت مقاومة الخط نفسه صغيرة بحيث يمكن أن تهمل ، فإننا نستطيع أن نحصل على التعبير الرياضي للقدرة المنتقلة بين المولد والمحرك كالآتي:

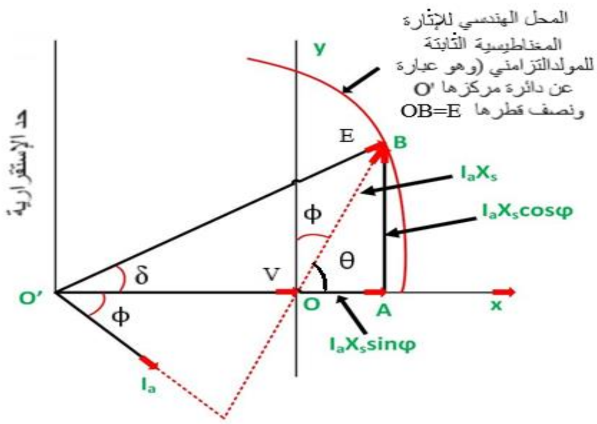
$$P = P_G - P_M = \frac{E_G E_M}{X} \sin\delta \qquad (2.1)$$

والقدرة المزامنة تعطى بالتعبير الرياضي الآتي:

$$P_{syn} \cong \frac{dP}{d\delta} = \frac{E_G E_M}{X} \cos\delta \qquad (2.2)$$

2-7 حد الإستقرارية Stability limit

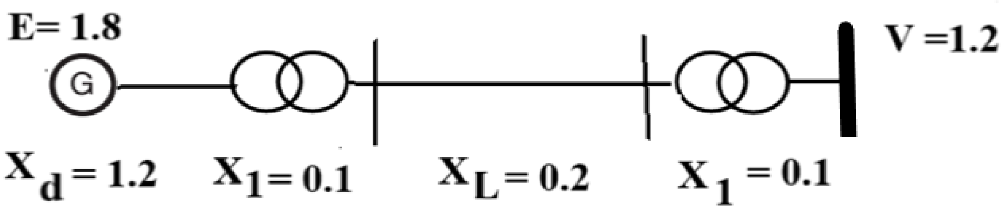
يمكن تفسير حد الإستقراية لمولد تزامني بالإشارة إلى الشكل 2-8 الذي يمثل مولد تزامني مربوط إلى قضيب توزيع لا نهائي فولتيته V وقد تم تثبيت قيمة تيار الإثارة المغناطيسية للمولد بحيث كانت الفولتية التي يولدها هي E وكانت زاوية الحمل δ هي الزاوية بين V و E وكانت ϕ هي زاوية ممانعة الدائرة المكافئة للمولد في الحالة المستقرة التي تمثل $Z_s = R_a + jX_s$ ، وإذا ازدادت زاوية الحمل زيادة جزئية صغيرة بالتدريج حتى تصبح $\delta = \theta$ عندئذ فان أية زيادة أخرى في القدرة الداخلة للمولد التي تسبب زيادة في زاوية الحمل خارج قيم الزاوية θ سوف تسبب هبوطاً في القدرة الخارجة وهذا يؤدي إلى تسارع حركة دوار المولد نفسه ويخرج عن التزامن بسبب الإختلاف في القدرتين الداخلة والخارجة .



الشكل 2-8.

مثال 2-1:

للمنظومة المبينة في الشكل 2-9 ما هو حد القدرة في حالة الاستقرار؟



الشكل 2-9 .

الحل :

حد القدرة في حالة الاستقرار :

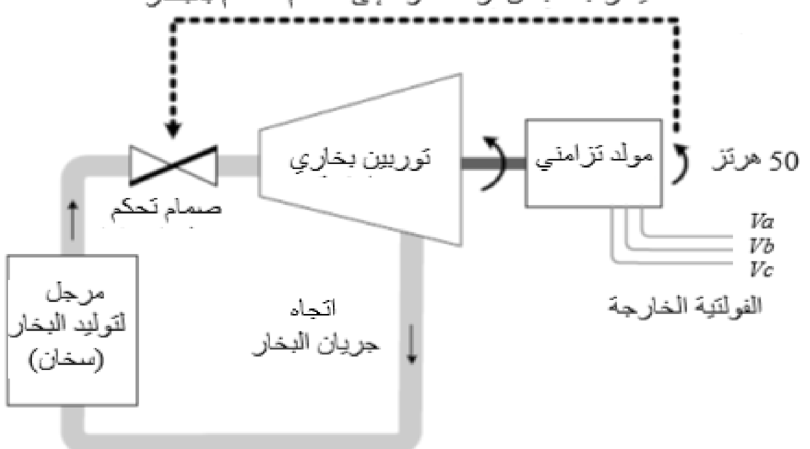
$$P_{max} = \frac{\lfloor E \rfloor \ . \lfloor V \rfloor}{\sum X} = \frac{1.8 \times 1.2}{1.2 + 0.1 + 0.2 + 0.1} = 1.35\ p.u.$$

الفصل 3 الماكنة التزامنية في منظومة القدرة

3-1 مقدمة

يعد المولد التزامني أهم عنصر في منظومة القدرة لكونه يقوم بتحويل الطاقة الميكانيكية الى طاقة كهربائية وضخها إلى شبكة القدرة ويتم توليد الطاقة الكهربائية على نطاق واسع بواسطة مولدات تزامنية ذات ثلاثة أطوار تسمى أيضاً بالمنوبات Alternators تدار بواسطة توربينات بخارية أو توربينات مائية أو توربينات غازية تسمى بالمدورات الأساسية Prime movers .

فعلى سبيل المثال في الشكل 3-1 الذي يمثل مولد تزامني يدار بواسطة توربين بخاري الذي يعمل بواسطة قوة البخار حيث يتم تسخين المياه إلى الدرجة التي تصل فيها إلى درجة الغليان وتوليد البخار من وحدة توليد البخار(السخان) الذي يتم ضخه تحت ضغط مرتفع لتشغيل التوربين البخاري ويتم ايصال التوربين بالمولد الكهربائي ميكانيكياً ليؤمن له الحركة والسرعة المطلوبة ، ويعمل هذا المولد على تحويل الطاقة الحركية إلى طاقة كهربائية يتم ايصالها بالشبكة عن طريق أسلاك موصلة، ويطلق على هذا النظام بنظام نقل الطاقة أو ما يعرف بالشبكة الكهربائية.



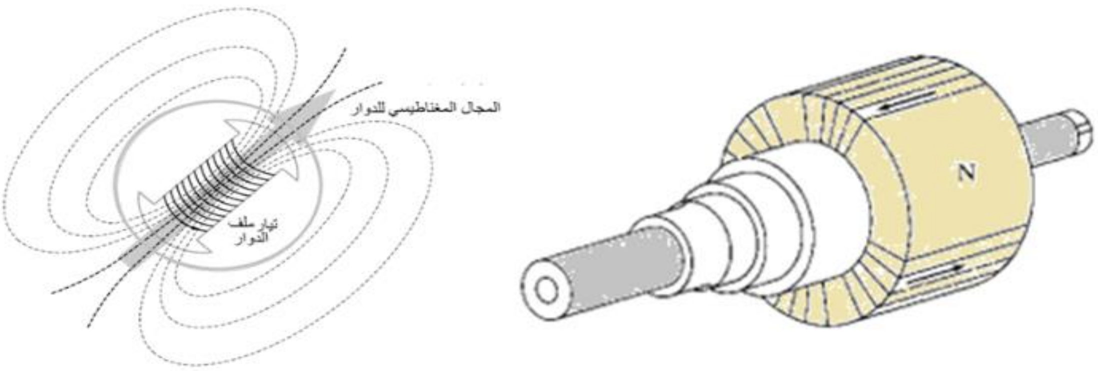
الشكل 3-1توليد الطاقة الكهربائية بواسطة المولدات التزامنية.

3-2 بنية المولد التزامني ذو الأطوار الثلاثة

يتكون المولد التزامني من عضوين رئيسيين مصنوعين من حديد عالي الإنفاذية المغناطيسية يشكلان الدائرة المغناطيسية للماكنة هما :

1. العضو الثابت ويسمى بالساكن Stator .
2. العضو الدائر ويسمى بالدوار Rotor وهو يدور بحرية تامة ضمن حيز الساكن.

ويوضع ملف مغناطيسي واحد أو أكثر على العضو الدوار لتوليد المجال المغناطيسي الرئيسي في الماكنة وتتم تغذيته بالتيار المستمر d.c. من دائرة كهربائية تسمى دائرة الإثارة Excitation circuit تجهز بقدرة كهربائية صغيرة نسبياً (حوالي 0.2 – 3 في المائة من قدرة الماكنة الكلية). ودائرة الإثارة هذه تعرف أيضاً بمنظومة الإثارة المغناطيسية للمولد وظيفتها توليد المجال المغناطيسي اللازم لتوليد الفولتية في الساكن وتنظيم قيمتها وكذلك التحكم بجريان القدرة المتفاعلة في الشبكة Reactive power . وتصمم ملفات الدوار لتعطي عدد من أزواج الأقطاب المغناطيسية أبسطها قطبان أو أربعة أقطاب أو أكثر التي عند تغذيتها بتيار مستمر تولد فيضاً مغناطيسياً واحداً ثابت القيمة كما موضح في الشكل 3-2. كذلك يزود الدوار بملف أو ملفات مقصورة الدائرة تعرف بلمفات التخميد Damper windings لغرض كبح سرعة الدوار في حالة فقدان الإستقرارية. أما تحريك الدوار واعطائه السرعة المطلوبة فيتم عن طريق المحرك أو المدور الأساسي Prime mover الذي هو عبارة عن توربين بخاري أو غازي أو مائي كما تم ذكره سلفاً.

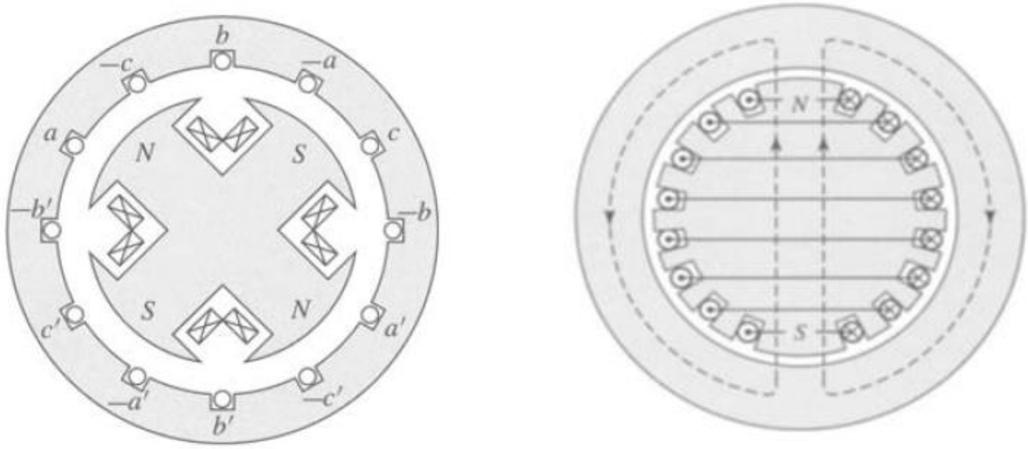


الشكل 3-2 المجال المغناطيسي الذي يولده التيار المستمر في ملف الدوار.

ويحدد شكل الدوار نوع الماكنة التزامنية الذي يكون عادة على نوعين ، أنظرالشكل 3-3 :

1. الدوار الأسطواني Cylindrical Rotor
2. الدوار ذو القطب البارز Saliant Pole Rotor

كلا النوعين له تطبيقات عملية معينة وخصائص من حيث السرعة و مسائل الإستقرارية كما سنأتي على ذكرها لاحقاً. بصورة عامة تطلق عبارة " ملفات المجال" Field windings على الملفات التي تولد المجال المغناطيسي الرئيسي في الماكنة ويطلق عليها أيضاً إسم " ملفات الدوار" Rotor windings وكلا التسميتين تستعملان للغرض نفسه أي أحدهما يعبرعن الآخر.



(ب) (أ)

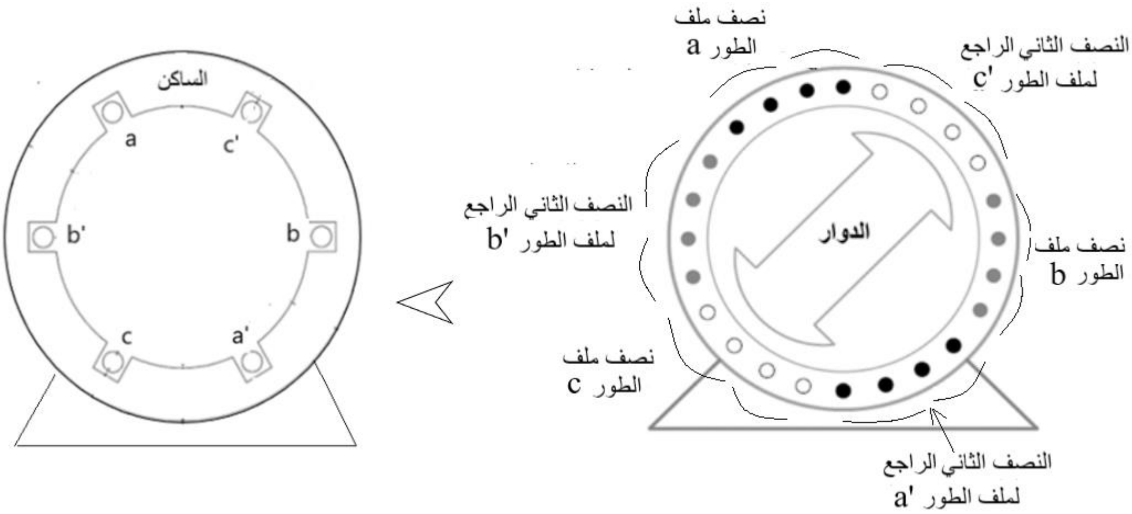
الشكل 3-3 : (أ) مولد تزامني ذو دوار اسطواني ، (ب) مولد تزامني ذو دوار بارز القطب.

أما في العضو الثابت أو الساكن Stator لهذه المكائن فتوضع مجموعة من الملفات التي يتم فيها توليد الفولتية أو القوة الدافعة الكهربائية (ق.د.ك) حيث يطلق على مجموعة الملفات هذه عند ربطها مع بعضها بملفات "عضو الإنتاج Armature winding " أو ببساطة "المنتج" " Armature ".

في المولدات التزامنية ذات الأطوار الثلاثة تصمم ملفات المنتج لتوليد ثلاث فولتيات متساوية في المقدار ومتوازنة في الطور ، أي ترتب الملفات الثلاثة فراغياً على محيط الساكن بحيث تكون بين كل منها زاوية فراغية مقدارها 120 درجة ، كما في الشكل 3-4 . أي أن المولد يجهز فولتية ذات ثلاثة أطوار متوازنة على أطرافه الخارجية (يشار إليها لاحقاً بفولتية ثلاثية الطور متوازنة) ، كذلك يتم ترتيبها لتنتج العدد نفسه من الأقطاب المغناطيسية التي ينتجها ملف المجال الموضوع على الجزء الدوار من الماكنة.

3-3 المفاهيم الأساسية للدوائر المغناطيسية

في هذا الفصل يفترض أن القارئ يكون لديه الإلمام الكافي في أساسيات الدوائر المغناطيسية والدوائر الكهربائية لكي يتفهم العلاقة بين القوة الدافعة المغناطيسية F والفيض المغناطيسي Φ وكثافة الفيض المغناطيسي B . هذه المتغيرات الثلاثة ذات أهمية كبيرة في فهم عمل المكائن الكهربائية بجميع أنواعها المختلفة سواء كانت مكائن تيار مستمر أو مكائن تيار متناوب .



الشكل 3-4 ملفات الساكن الثلاثة المولدة للفولتية ثلاثية الطور .

تصنع معظم اجزاء الدوائر المغناطيسية ومنها المكائن الكهربائية عادة من مواد ذات إنفاذية مغناطيسية عالية Permeability High التي من شأنها أن تحصر الفيض المغناطيسي المتولد فيها ضمن المسار المعرَف ببنيتها فقط كما يمر التيار الكهربائي جميعه في الدائرة الكهربائيًة مثلا.

إن الحلول الكاملة والتفصيلية للمجالات المغناطيسية لمعظم الحالات العملية ذات الاهتمامات الهندسية تتضمن بلا شك حلول معادلات العالم ماكسويل الشهيرة سوية مع القوانين والعلاقات الأساسية المتعددة التي تصف خصائص المواد . ومع أنه من الناحية الواقعية العملية لا يمكن الحصول على حلول مضبوطة لهذه المعادلات بدون عمل بعض الفرضيات والتقريبات التي من شأنها أن تعطي نتائج مقبولة من الناحية الهندسية. لذلك في البداية سوف نبدء بفرض أن النظام المغناطيسي تحت الدراسة ذي تردد بحيث يجعلنا أن نهمل الحد الخاص بتيار الإزاحة Displacement current في معادلات ماكسويل كون أن هذا الحد يعني بالمجال الكهرومغناطيسي المتغلغل في الفراغ البعيد على شكل إشعاع ناتج عن المجال الكهربائي المتغيرباستمرار مع الزمن. فاذا أهملنا هذا الحد فسوف نحصل على صيغ مغناطيسية شبه ساكنة (ستاتيكية) لمعادلات ماكسويل التي تربط العلاقة بين المجالات المغناطيسية مع التيار الكهربائي الذي ينتجها. هذه العلاقات هي كما معطات في المعادلات المشهورة التالية:

$$\oint (C)\ H.dl = \oint (S)\ J.da \qquad (3.1)$$

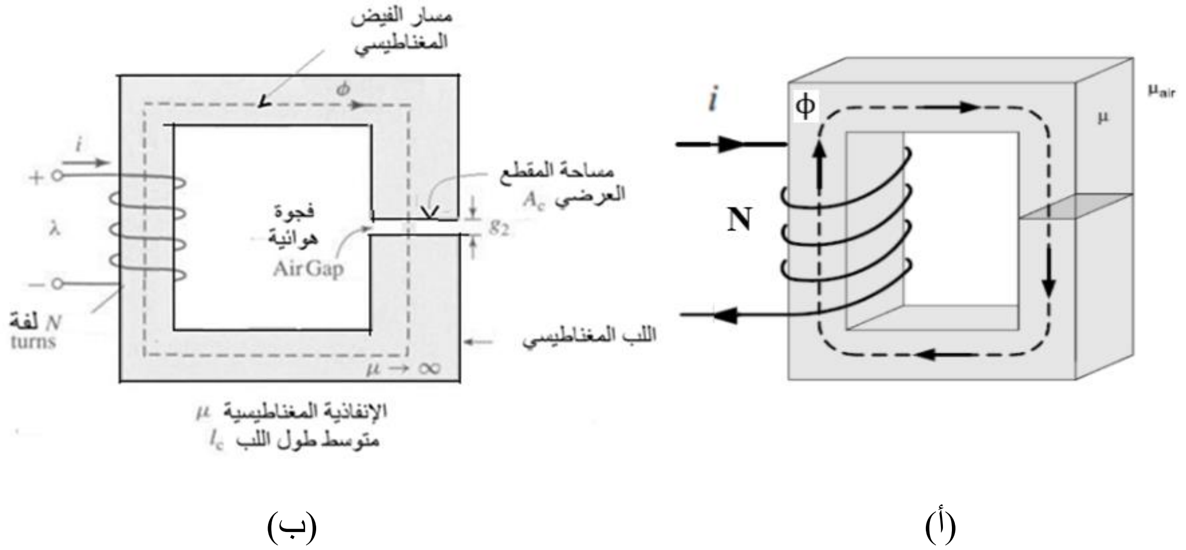
$$\oint (S)\ B.da = 0 \qquad (3.2)$$

تنص المعادلة (3.1) على أن التكامل الخطي للمركبة المماسية لشدة المجال المغناطيسي H حول محيط خط كنتوري مغلق C يساوي التيار الكلي المار خلال أي سطح يتعشق أو يترابط مع هذا الخط الكنتوري.

عليه فانه من المعادلة (3.1) نجد أن مصدر H هو كثافة التيار J . أما المعادلة (3.2) فتبين أن كثافة المجال المغناطيسي B هي كمية محافظة أي أنه لايوجد فيض مغناطيسي داخل أو خارج من سطح مغلق، لكن هذا يعني أن كل الفيض المغناطيسي ϕ الذي يدخل إلى سطح يحيط به حجم معين يجب أن يخرج من هذا الحجم من أي جزء آخر من هذا السطح فقط لكون أن خطوط الفيض تشكل خطوط مغلقة في كل الأحوال. هذا الكلام يمكن أن يصاغ بمعادلة رياضية تعبر عن قيمة الفيض المغناطيسي ϕ الذي يدخل سطحاً معيناً S بوصفه هو التكامل السطحي لمركبة كثافة الفيض الاعتيادية B ، لذا

$$\phi = \oint_S B.da \qquad (3.3)$$

ولشرح هذا الكلام: إنه لو كان لدينا حجم محاط بسطح كالذي في الشكل 3-5 (أ) وتم توليد فيضاً مغناطيسياً ϕ داخل هذ السطح فان هذا الفيض سوف ينساب في داخل هذا الحجم فقط كما في الشكل 3-5(ب). مثال على ذلك فالدائرة المغناطيسية البسيطة في الشكل 3-5(أ) لها لب (قلب) حديد ذي إنفاذية عالية جداً أكبر بكثير من الهواء المحيط ($\mu >> \mu_0$) وتم تزويد هذه الدائرة بملف عدد لفاته N وتم تغذَية هذا الملف بتيار i فسوف تتولد قوة دافعة مغناطيسية (ق.د.مغ) (MMF) تكون قيمتها ($F=Ni$). هذه القوة سوف تعمل على الدائرة المغناطيسية وتولد فيضاً مغناطيسياً .



(ب) (أ)

الشكل 3-5 : (أ) دائرة مغناطيسية بسيطة، (ب) منظرجانبي للدائرة يوضح توليد الفيض المغناطيسي داخلها.

هذه الحقائق الواردة سلفاً تبرر الفرض بأن كثافة الفيض المغناطيسي تكون متجانسة تماماً خلال المقطع العرضي للدائرة المغناطيسية مثل تلك التي في الشكل 3-5(ب) . في هذه الحالة فان المعادلة (3.1) تختصر إلى معادلة محجمة قياسية :

$$\phi_c = B_c A_c \tag{3.4}$$

حيث أن

ϕ_c = الفيض في اللب
B_c= كثافة الفيض في اللب
A_c = مساحة المقطع العرضي في اللب

ومن المعادلة (3.1) تكون العلاقة بين القوة الدافعة المغناطيسية (ق.د.مغ) العاملة على الدائرة المغناطيسية هي :

$$F = Ni = \oint Hdl \tag{3.5}$$

إن أبعاد اللب للدائرة المغناطيسية تكون بحيث أن طول مسار الفيض يكون تقريباً مساوياً إلى متوسط طول اللب l_c ونتيجة لذلك فان التكامل الخطي للمعادلة (3.5) يكون ببساطة $H_c l_c$ أي حاصل ضرب مقدار H مع متوسط طول اللب l_c . لذا فان العلاقة بين الـ ق.د.مغ وشدة المجال يمكن كتابتها ببساطة:

$$F = Ni = H_c l_c \tag{3.6}$$

حيث H_c هو معدل قيمة H داخل اللب .

أما العلاقة بين شدة المجال المغناطيسي H وكثافة الفيض المغناطيسي B فتعتمد على الخواص المغناطيسية للمواد لكنها بصورة عامة تعطى بالمعادلة البسيطة التالية :

$$B = \mu H \tag{3.7}$$

حيث μ هي الإنفاذية المغناطيسية .

في النظام الدولي للمقاييس SI يقاس H بوحدة الأمبير لكل متر، وتقاس B بالويبر لكل متر مربع (وتعرف أيضاً بالتسلا (T)) وتقاس μ بالويبر لكل أمبير- لفة – متر أو تقاس بالهنري لكل متر. أما قيمة الإنفاذية للفراغ الحر أو الهواء فتساوي $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ هنري لكل متر، وللمواد المغناطيسية بصورة عامة تحسب الإنفاذية لها بضرب الإنفاذية للهواء بالإنفاذية النسبية لهذه المادة μ_r : أي $\mu = \mu_r \mu_0$. وتتراوح قيم μ_r النموذجية بين 2000 إلى 80000 للمواد التي تصنع منها المكائن الكهربائية والمحولات بصورة عامة.

أما العلاقة بين القوة الدافعة المغناطيسية وكثافة الفيض فتكون كالآتي

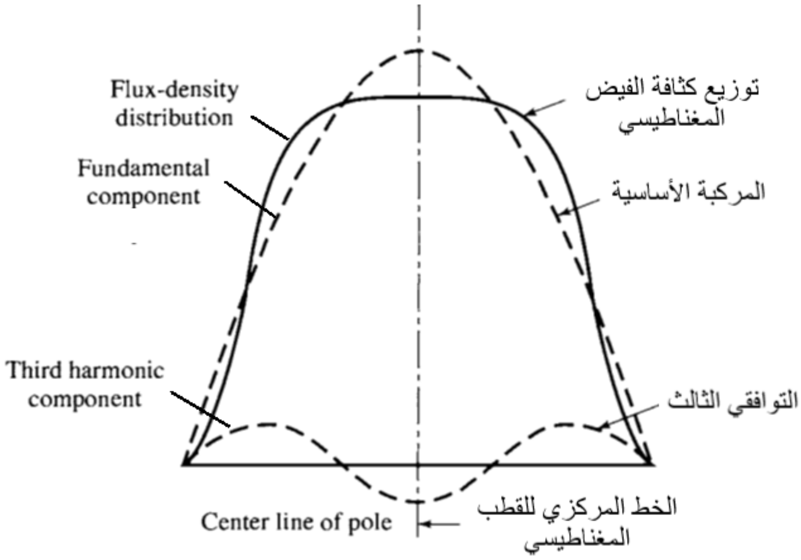
$$F = H.l = \frac{B}{\mu} \times l$$

$$\therefore F \propto B \qquad (3.8)$$

لكون $\frac{l}{\mu} =$ ثابت .

3-4 توزيع الفيض المغناطيسي والقوة الدافعة المغناطيسية في الماكنة التزامنية

عندما يتم تغذية ملف الدوار بتيار مستمر فسوف يولد فيضاً مغناطيسياً في الفجوة الهوائية ($\emptyset_o$ في القطب الواحد) . هذا الفيض المغناطيسي ϕ_o سيولد كثافة مغناطيسية في الماكنة التزامنية B متوزعة كما موضحة في الشكل 3-6 . ويكون توزيع كثافة الفيض المغناطيسي على صيغة موجة جيبية غير صافية، أي أنها تحتوي على مركبات توافقية ، لكن المركبة الأساسية تكون موجة جيبية صافية وهي المؤثرة في توليد القوة الدافعة الكهربائية .



الشكل 3-6 صيغة موجة كثافة الفيض المغناطيسي مبينة المركبة الأساسية والتوافقي الثالث.

باهمال التوافقيات المتولدة في الدوار للمولد التزامني ذي الدوار الأسطواني نتيجة التوزيع الفراغي لكثافة الفيض المغاطيسي وكذلك للقوة الدافعة المغناطيسية المنتجة لها ، يمكن في هذه الحالة تمثيل القوة الدافعة المغناطيسية F_r بشكل اتجاهي ذلك لأن المركبة الأساسية الجيبية هي التي ستكون باقية ومؤثرة وتؤخذ فقط بعين الاعتبار.

لنتأمل بداية في مولد تزامني ثلاثي الطور ذو قطبين المبين في الشكل 3-2. العضو الدوار والعضو الساكن لهذا المولد يتم تصنيعهما من الحديد عالي الإنفاذية المغناطيسية للحصول على أعلى نسبة ممكنة لكثافة الفيض إلى القوة الدافعة المغناطيسية (B/F). إن الشكل 3-4 يوضح كل لفيفة طور في الساكن وكأنها لفة واحدة (الملفات aa' و bb' و cc') موضوعة في زوج واحد من الخنادق . لكن في الحقيقة هو عبارة عن ملف متعدد اللفات موزع في عدد من الخنادق في العضو الساكن. هذه الملفات الثلاثة مرتبة فراغياً بحيث تكون الزاوية بين كل منها 120 درجة كما ورد ذكرها سلفاً.

الآن لنتأمل كيف تتولد القوة الدافعة الكهربائية في ملفات الساكن (المنتج) ، فعندما يتم تغذية ملف الدوار بتيار مستمر فسوف يتولد فيضاً مغناطيسياً في الفجوة الهوائية ، وإذا جعلنا الدوار يدور بسرعة دورانية ثابتة (ω) فان الفيض الذي يترابط مع ملفات المنتج يتغير مع الزمن أي أن الفيض المترابط مع الملف سيتغير مع موضع محور القوة الدافعة المغناطيسية ωt والفيض الذي يترابط مع الملف المتمركز aa' ذي عدد لفات N سيكون أعظم ما يمكن عند الزاوية $\omega t = 0$ ويكون مقداره صفراً عند $\omega t = \frac{\pi}{2}$ أي تكون موجته جيب تمامية : $\lambda_a = N\phi_o \cos \omega t$ ، حيث λ_a هو الفيض ϕ_o الذي يترابط مع N عدد من اللفات من الملف ، والفولتية المحتثة في الملف aa' ستكون حسب قانون فارادي

$$e_a = -\frac{d}{dt}\lambda_a = N\phi_o\omega \sin \omega t$$

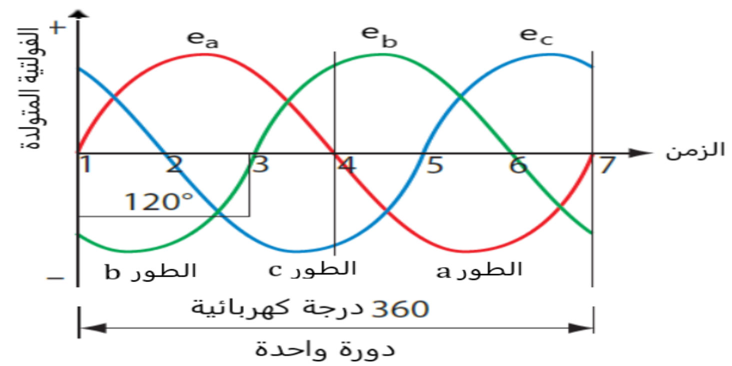
$$e_a = E_m \sin \omega t \qquad (3.9)$$

حيث : $2\pi f N\phi_o = N\phi_o\omega = E_m$ وهي قيمة الفولتية المتولدة العظمى.

بالأسلوب نفسه ستتولد فولتية e_b و فولتية e_c في الملفين b و c بينهما 120 درجة كما في الشكل 3-7.

$$e_b = E_m \sin(\omega t - 120°) \qquad (3.10)$$

$$e_c = E_m \sin(\omega t - 240°) \qquad (3.11)$$

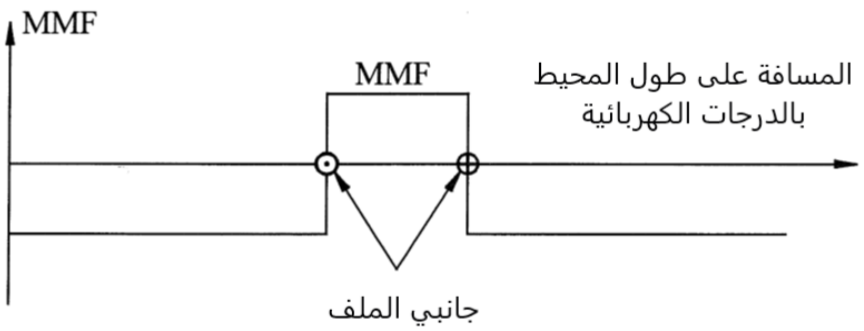


الشكل 3-7الفولتيات المتولدة في ملفات الساكن الثلاثة لمولد تزامني.

3-5 تولد القوة الدافعة المغناطيسية F والفيض ϕ وكثافة الفيض B في ملفات الساكن

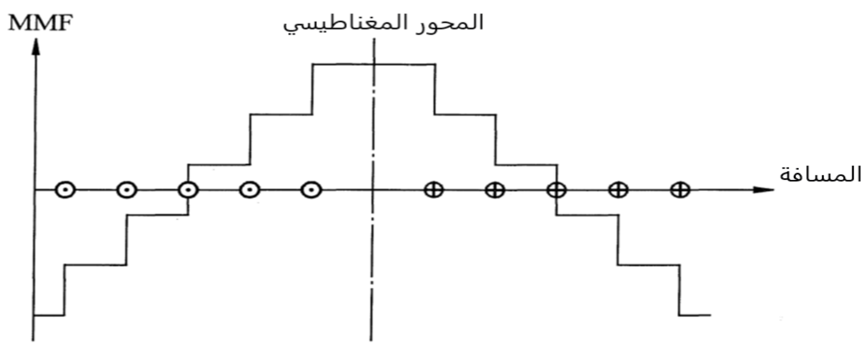
3-5-1 موجة القوة الدافعة المغناطيسية

عملياً في المكائن التزامنية فان ملفات الساكن وملفات الدوار الأسطواني يتم توزيها في خنادق عديدة لكي يكون شكل موجة القوة الدافعة المغناطيسية الناتجة في الفراغ لها صيغة جيبية تقريباً . في البداية دعنا نتأمل موجة الـ ق.د.مغ (MMF) لملف الساكن فقط. لملف واحد في الطور a المبين في الشكل 3-8 الذي فيه توضيح الساكن وقد تم قطعه عرضياً وسحبه بصورة طولية لبيان شكل القوة الدافعة المغناطيسية والتي بدا شكلها كموجة مربعة .

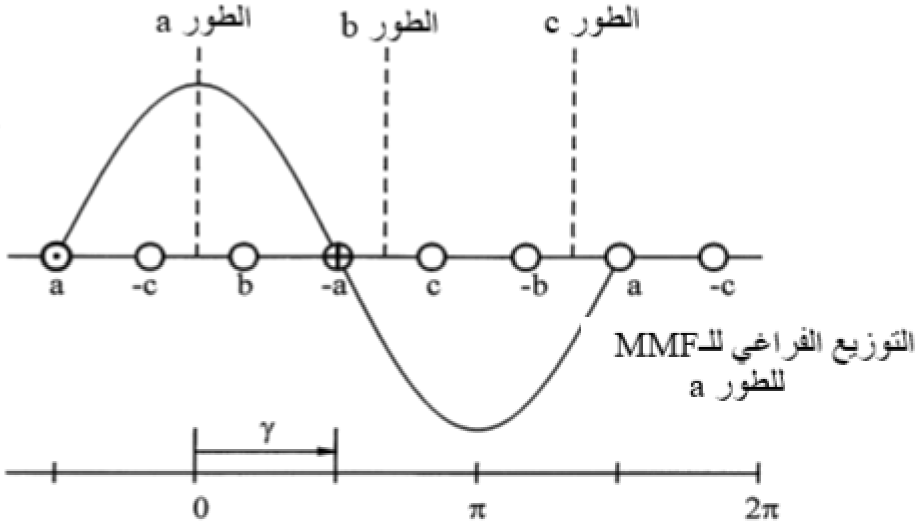


الشكل 3-8 موجة القوة الدافعة المغناطيسية MMF لملف واحد مفرد.

بإضافة ملفات أكثر سوف يتم الحصول على توزيع للـ MMF كما في الشكل 3-9 حيث نلاحظ أنه كلما زيد عدد الملفات تقترب صيغة الموجة من شكلها المربع إلى الموجة الجيبية ، ويتم تقليل التوافقيات في الموجة المذكورة بواسطة تطوير التصاميم الخاصة بالملفات نفسها. ولتحليلات أداء الماكنة التزامنية بصورة عامة يتم الفرض بأن توزيع الـ MMF للأطوار الثلاثة يكون جيبياً تقريباً وأن التوافقيات وتأثيرها لا يؤخذ بعين الإعتبار. إلا أن هذه التوافقيات تسبب تيارات دوارة في جسم الدوار وكذلك تزيد من المفاعلة التسربية للساكن. ويوضح الشكل 3-10 توزيع الـ MMF الفراغي المطلوب.



الشكل 3-9 موجة الـ MMF لملفات متعددة .



الشكل 3-10 التوزيع الفراغي للقوة الدافعة المغناطيسية للطور a.

3-5-2 المجال المغناطيسي الدائر

عرفنا في الفقرة السابقة كيف أن الفولتية تتولد في ملفات الساكن لمولد تزامني ثلاثي الطورنتيجة دوران المغناطيس الموجود على الدوار وقطعه وترابطه مع هذه الملفات الثابتة. لكنه عندما يتم ربط مولد تزامني إلى منظومة قدرة كبيرة تحتوي على مولدات تزامنية كثيرة فإن الفولتية والتردد على أطرافه سيكونان ثابتين تماماً وستجري تيارات في كل طور في ملفاته الثلاثة a و b و c المبينة في الشكل 3-4. هذه التيارات سوف تولد ثلاث قوى دافعة مغناطيسية هي F_a و F_b وF_c. وهذه القوى المغناطيسية سوف تولد بدورها فيضاً مغناطيسياً في كل ملف Φ_a وΦ_b و Φ_c . وهذه الفيوض ستولد كثافات مغناطيسية ثلاث أيضاً وهي B_a و B_b و B_c تكون مجتمعة إتجاهياً في الفجوة الهوائية بين الساكن والدوار.

الآن لكي نرى ماذا يحدث في أية لحظة معينة من الزمن داخل الماكنة التزامنية . دعنا نفرض أن التيارات الجارية في ملفات الساكن الثلاثة هي تيارات جيبية كالآتي:

$$i'_{aa}(t) = I_m \sin \omega t \quad A \qquad (3.12)$$

$$i'_{bb}(t) = I_m \sin(\omega t - 120°) \ A \qquad (3.13)$$

$$i'_{cc}(t) = I_m \sin(\omega t - 240°) \ A \qquad (3.14)$$

هذه التيارات في الملفات aa’ و bb’ وcc’ سوف تنتج ثلاث قوى دافعة مغناطيسية كما في المعادلات

$$F_{aa'}(t) = F_m \sin \omega t \angle 0° \qquad (3.15)$$

$$F_{bb'}(t) = F_m\, sin(\,\omega t - 120°)\angle 120° \qquad (3.16)$$

$$F_{cc'}(t) = F_m\, sin(\,\omega t - 240°)\angle 240° \qquad (3.17)$$

لنتأمل الآن في مقدار محصلة هذه القوى الدافعة المغناطيسية لملفات الساكن وتغيرها مع الزمن؛ ففي اللحظة الزمنية عندما تكون $\omega t = 0°$ تكون هذه القوى كما في الشكل3-11 (أ) :

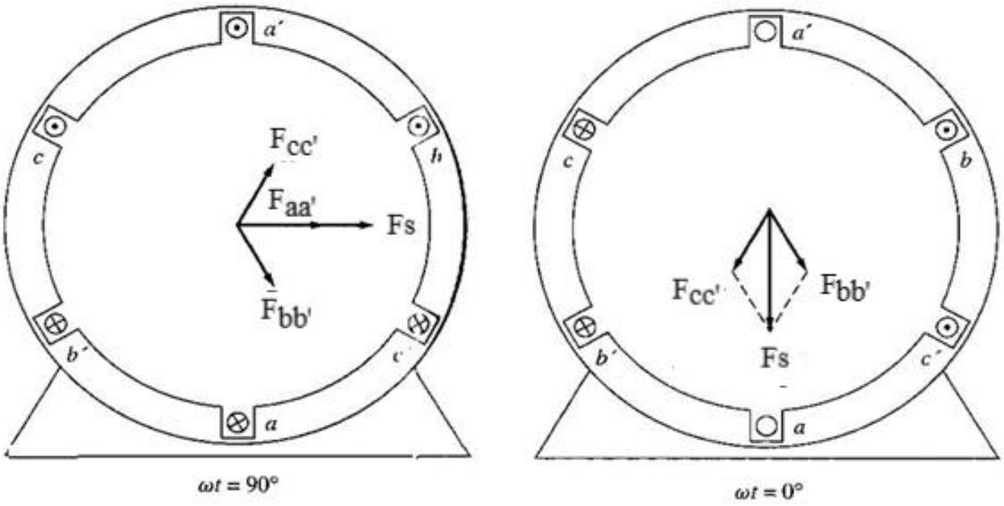
$$F_{aa'} = 0 \qquad (3.18)$$

$$F_{bb'} = F_m\, sin(-120°)\angle 120° \qquad (3.19)$$

$$F_{cc'} = F_m\, sin(-240°)\angle 240° \qquad (3.20)$$

هذه المجالات الكهربائية الثلاثة أعلاه سوف تتجمع بالإضافة الإتجاهية مع بعضها في الفجوة الهوائية مولدةً محصلة قوة مغناطيسية واحدة معطاة في المعادلة (3.21) ناتجة عن ملفات الساكن :

$$F_s = F_{aa'} + F_{bb'} + F_{cc'} \qquad (3.21)$$



(ب) (أ)

الشكل3-11 : محصلة المجال المغناطيسي Fs لملفات الساكن في الماكنة التزامنية : (أ) عندما $\omega t = 0°$، (ب) عندما $\omega t = 90°$.

$$F_s = 0 + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}F_m\right)\angle 120° + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}F_m\right)\angle 240° = \frac{3}{2}F_m\angle -90° \qquad (3.22)$$

في اللحظة الزمنية عندما تكون $\omega t = 90°$ تكون القوى الدافعة المغناطيسية ، أنظر الشكل3-11 (ب):

$$F_{aa'} = F_m \angle 0° \qquad (3.23)$$

$$F_{bb'} = -\frac{1}{2} F_m \angle 120° \qquad (3.24)$$

$$F_{cc'} = -\frac{1}{2} F_m \angle 240° \qquad (3.25)$$

على هذا الأساس ففي أية لحظة من الزمن سيتكون لدينا مجال مغناطيسي مقداره $\frac{3}{2} F_m$ يدورباستمرار في الفجوة الهوائية بين الساكن والدوار للماكنة التزامنية بسرعة زاوِيَّة ω . ولإثبات ذلك رياضياً أفرض أننا نمثل اتجاه المجال المغناطيسي بالصيغة الآتية :

$\hat{x}$ = وحدة متجه بالاتجاه الأفقي

$\hat{y}$= وحدة متجه بالاتجاه العمودي

لإيجاد القوة الدافعة المغناطيسية الكلية الناتجة عن تيارات الساكن نقوم بجمع المجالات المغناطيسية التي انتجتها ملفات الساكن الثلاثة السالفة جمعاً إتجاهياً ونحسب النتيجة كالآتي:

نحن نعرف أن صافي مجموع القوى المغناطيسية هو

$$F_s(t) = F_m \sin \omega t \angle 0° + F_m \sin(\omega t - 120°) \angle 120° + F_m \sin(\omega t - 240°) \angle 240° \qquad (3.26)$$

بعدها نحول صافي مجموع القوى المغناطيسية أعلاه إلى صيغة وحدة المتجه ليعطي:

$$F_s(t) = (1.5 F_m \sin \omega t)\hat{x} - (1.5 F_m \cos \omega t)\hat{y} \qquad (3.27)$$

نلاحظ من المعادلة أعلاه أن مقدار المجال المغناطيسي هو ثابت $\frac{3}{2} F_m$ وتتغير زاويته باستمرار باتجاه معاكس لدوران عقرب الساعة وبسرعة زاوِيَّة ω كما موضح في الشكل 3-12. في هذا الشكل الذي يوضح المجال المغناطيسي الدائر في الساكن يمكن أن يتم تمثيله بقطب مغناطيسي شمالي (الفيض المغناطيسي يخرج من الساكن) والآخر جنوبي (الفيض المغناطيسي يدخل إلى الساكن).

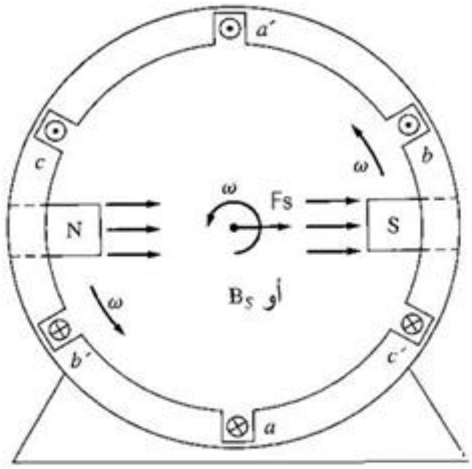
هذه الأقطاب المغناطيسية تكمل دورة ميكانيكية واحدة كاملة حول الساكن في كل دورة كهربائية للتيار الكهربائي الجاري في ملفات الساكن. وسرعة دوران المجال المغناطيسي بالدورة في الدقيقة سوف تساوي التردد بالهيرتز، أي أنه لقطبين مغناطيسيين في الساكن ستتولد قوة دافعة كهربائية في الطور الواحد يكون ترددها بالدورة في الثانية الواحدة (هرتز) هو نفس سرعة دوران الدوار بالدورة الميكانيكية في الثانية الواحدة : أي أن التردد الكهربائي للفولتية المتولدة يتزامن أو يتواقت مع السرعة الميكانيكية ، لهذا السبب

تم تسمية الماكنة أو تعرف بـ "الماكنة التزامنية" "synchronous machine"، حيث يرتبط التردد المتولد بعدد أقطاب الماكنة التزامية بالمعادلة الرياضية :

$$f = \frac{n_s \times p}{120}$$

حيث :
f = التردد – الهرتز
n_s = السرعة التزامنية - دورة/دقيقة
p =عدد الأقطاب المغناطيسية

أي أنه إذا كان تردد الفولتية 50 هرتز فان الماكنة يجب أن تدور بسرعة 3000 دورة في الدقيقة ، ويجب أن تكون سرعتها 3600 دورة في الدقيقة لتولد فولتية ذات تردد 60 هرتز.



الشكل 3-12 محصلة المجال المغناطيسي الدائرالناتج عن تيارات ملفات الساكن الثلاثة.

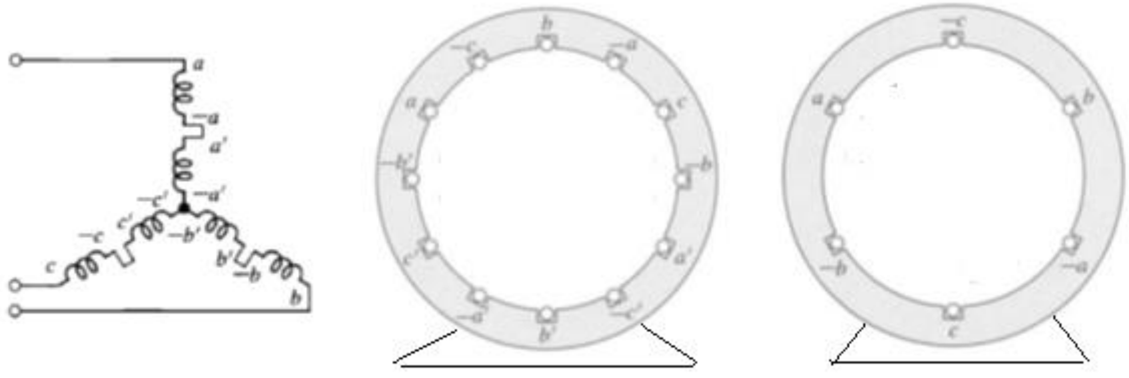
إن كثير من المكائن التزامنية الكبيرة يكون لها أقطاب عددها أكثر من قطبين ويتم ذلك بزيادة عدد ملفات الساكن للطورالواحد كما موضح في الشكل 3-13 الذي زيد عدد الملفات في كل طور إلى إثنان للحصول على ماكنة ذات أربعة أقطاب .

3-6 العلاقة بين التردد الكهربائي والتردد الميكانيكي

لفهم العلاقات بين التردد الكهربائي f_e والتردد الميكانيكي f_m فيمكن شرحها كالآتي:

التردد الكهربائي بالهيرتز f_e = التردد الميكانيكي f_m (دورة في الثانية)

f_e (hertz) = f_m (revolutions per second)



(جـ) (ب) (أ)

الشكل 3-13 : (أ) منتج بملف واحد لكل طور، (ب) منتج بمضاعفة ملفاته إلى اثنان في كل طور للحصول على أربعة أقطاب مغناطيسية للساكن ، (جـ) أسلوب ربط الملفات للأطوار الثلاثة في الماكنة ذات الأقطاب الأربعة.

وبما أن التردد الزاوي الكهربائي $\omega_e = 2\pi f_e$، فالتردد الزاوي الميكانيكي $\omega_m = 2\pi f_m$ أيضاً. عليه فإن ω_e (زاوية نصف قطرية في الثانية) = ω_m (زاوية نصف قطرية في الثانية)

$$\omega_e \text{ (radians per second)} = \omega_m \text{ (radians per second)}$$

الآن إذا تم مضاعفة عدد الملفات في الساكن فسوف ينتج عن ذلك أن التيارات الثلاثية الطور سوف تنتج قطبين شماليين وقطبين جنوبيين ، أي أن مجموع الأقطاب المغناطيسية للساكن سيكون أربعة أقطاب كما مبين في الشكل 3-13. لذا فللملف ذي أربعة أقطاب تصبح العلاقة بين التردد الكهربائي والتردد الميكانيكي:

$$f_e = 2\, f_m$$

$$\omega_e = 2\, \omega_m$$

عليه تكون الصيغة العامة للتردد كالآتي :

$$f_e = \frac{P}{2} f_m$$

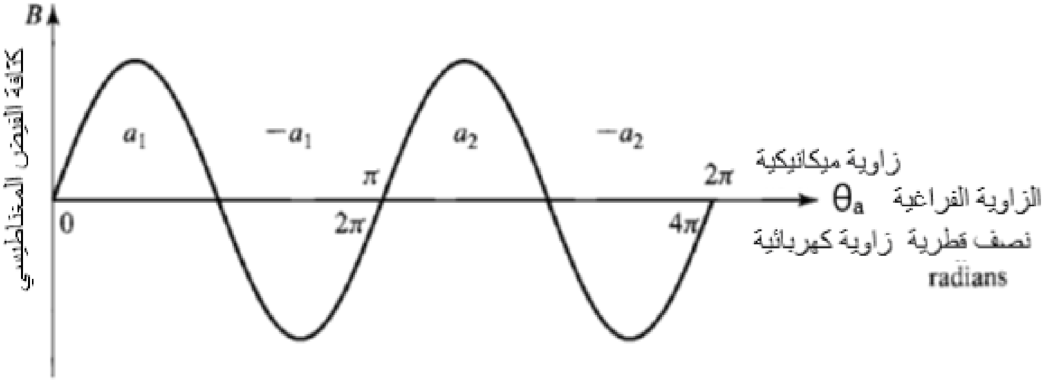
حيث P هو عدد اقطاب الساكن. ويكون التوزيع الفراغي لمحصلة كثافة الفيض المغناطيسي في الفجوة الهوائية لمولد تزامني مثالي ذي أربعة أقطاب كما هو موضح في الشكل 3-14.

أما التردد الزاوي الكهربائي فسوف يكون : $\omega_e = (P/2)\, \omega_m$

ولما كانت : $f_m = \dfrac{n_m}{60}$

حيث n_m هي عدد الدورات الميكانيكية في الثانية اواحدة فإن التردد الكهربائي بالهرتز سيكون :

$$\therefore \; f_e = \frac{n_m}{120} P \qquad (3.28)$$



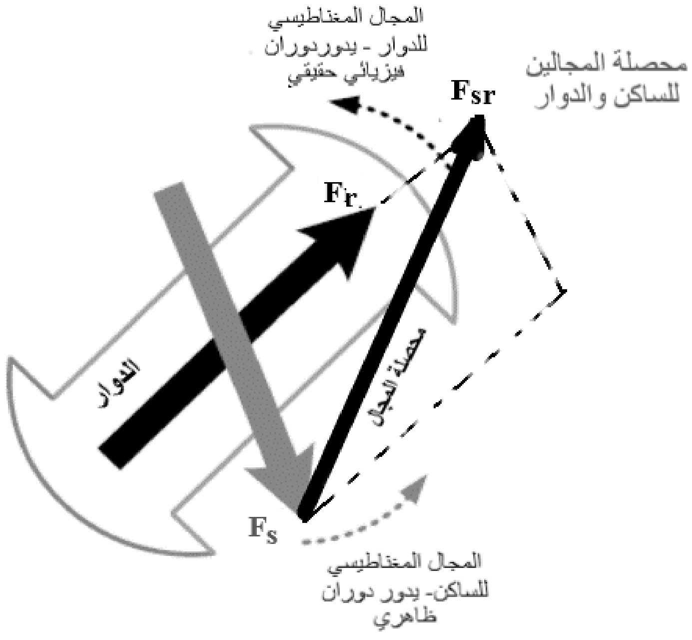
الشكل3-14 التوزيع الفراغي لمحصلة كثافة الفيض المغناطيسي في الفجوة الهوائية لمولد تزامني مثالي ذي أربعة أقطاب .

3-7 تمثيل الماكنة التزامنية في حالة الاستقرار - محصلة المجال المغناطيسي - الدائرة المكافئة

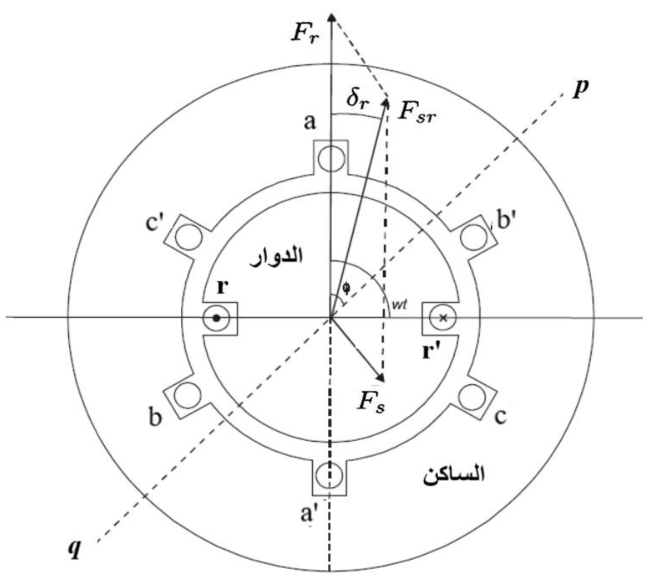
3-7-1 محصلة المجال المغناطيسي

لقد بينا في الفقرة السابقة كيف تتولد محصلة القوة الدافعة المغناطيسية F_s في ملفات الساكن عند مرور تيارات متوازنة في الأطوار الثلاثة للمولد. وبما أنه كما تم ذكره سلفاً عند تغذية ملف المجال المغناطيسي في الدوار بتيار مستمر وإعطائه سرعة تزامنية بواسطة المدور التوربيني فسوف تتولد قوة دافعة مغناطيسية Fr كمحصلة تدور بسرعة تزامنية أيضاً . هذا يعني أنه اصبح لدينا في الماكنة مجالين مغناطيسيين يدوران بسرعة تزامنية واحدة وبينهما زاوية تعتمد على عامل القدرة للحمل تسمى زاوية الدوار. أي أنه بتعبير آخر ستكون هناك قوتان دافعتان مغناطيسيتان تجتمعان اتجاهياً لتكونان محصلة مجال واحد فقط F_{sr} تدور بسرعة تزامنية في الفجوة الهوائية وهي التي تكون مسؤلة على إنتاج الفيض في الماكنة وتوليد القوة الدافعة الكهربائية e في ملفات الساكن الثلاثة. أنظر الشكل 3-15 لماكنة بسيطة ذات قطبين ذات قطب بارز.

أما بالنسبة للماكنة التزامنية البسيطة ذات الدوارالاسطواني التي لها قطبان فيكون المبدأ نفسه بالنسبة لمحصلة القوى الدافعة المغناطيسية كما هو موضح في الشكل 3-16 .



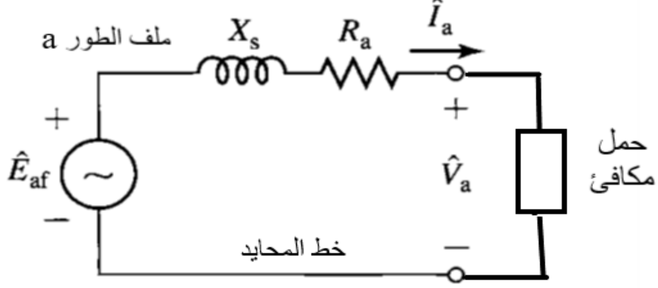
الشكل 3-15 محصلة القوة الدافعة المغناطيسية التي تنتج في الفجوة الهوائية للماكنة التزامنية البسيطة ذات القطب البارز وذات القطبين عند عامل قدرة متأخر.



الشكل 3-16 محصلة القوى الدافعة المغناطيسية في الماكنة التزامنية البسيطة ذات الدوار الاسطواني بقطبين عند عامل قدرة متأخر.

3-7-2 الدائرة المكافئة التقريبية للماكنة التزامنية

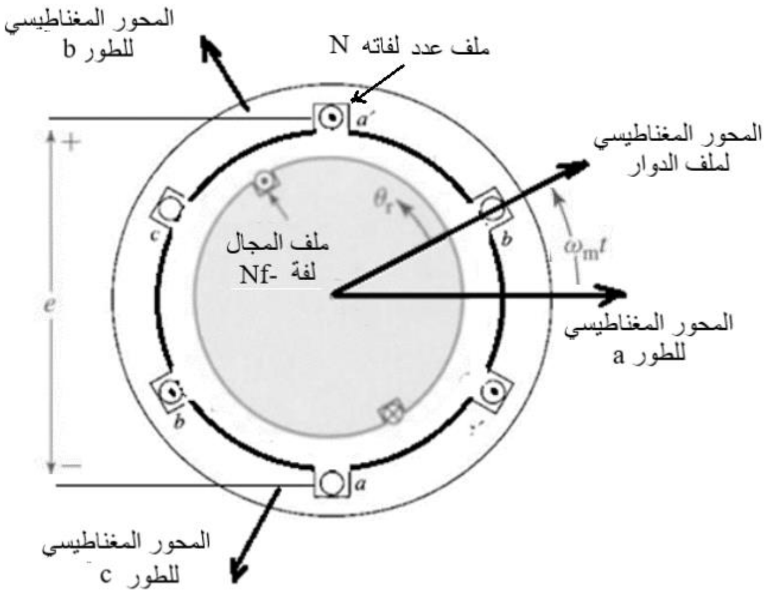
في تحليلات منظومات القدرة الكهربائية من المعتاد أن تمثل الماكنة التزامنية بدائرة مكافئة بسيطة كما موضحة في الشكل 3-17 التي تمثل طور واحد فقط لمولد تزامني ذي ثلاثة أطوار يولد ثلاث فولتيات متوازنة ومحمل بحمل متوازن. في هذه الدائرة البسيطة E_{af} (وتكتب في بعض المراجع E للسهولة) تمثل القوة الدافعة الكهربائية المحتثة في ملف الطور a حسب قانون فاراداي الأول عند إعطاء الدوار سرعة تزامنية n_s وعند قطع الفيض المغناطيسي ϕ لموصلات الملف a . أما R_a و X_s فتمثلان مقاومة ملف الطور a ومفاعلة الطور a على التوالي. وتمثل الفولتية V_a قيمة ج.م.ت لفولتية الطرف (خط- إلى – محايد) للطور a . وتسمى المفاعلة X_s بالمفاعلة التزامنية وتكون قيمتها ثابتة إذا اشتغلت الماكنة ذات الدوار الأسطواني في ظروف مستقرة بدون أن يحصل تشبع مغناطيسي للحديد المصنوعة منه وتتغير قيمتها بزيادة التشبع وكذلك عند تعرض الماكنة لإضطرابات أو لحالات عابرة كما سنأتي على مناقشة ذلك في الفقرات القادمة.



الشكل 3-17 : الدائرة المكافئة التقريبية لطور واحد لماكنة تزامنية ذات ثلاثة أطوار بدوار أسطواني تحت ظروف مستقرة ومتزنة.

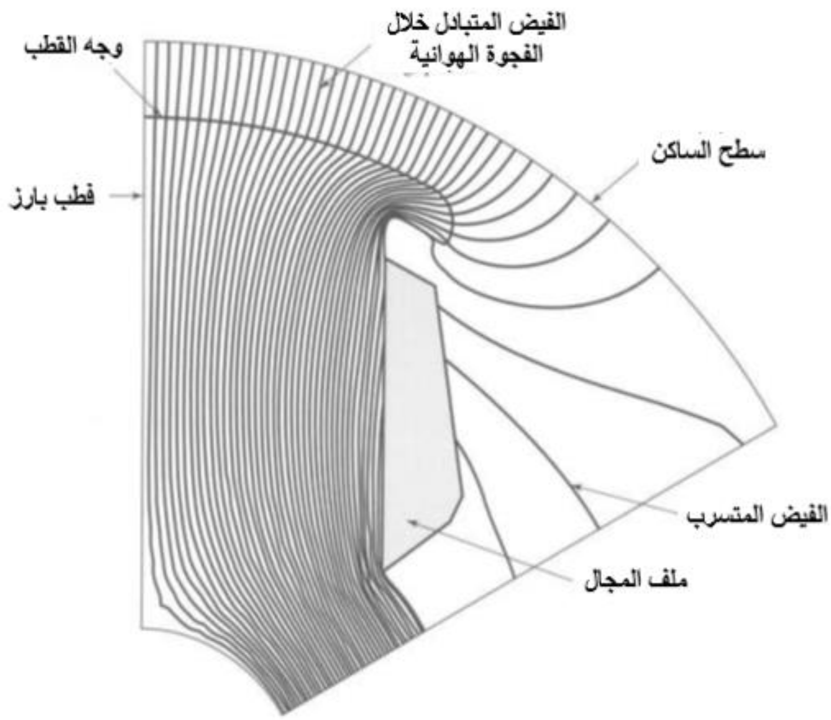
وتجدر الإشارة إلى أن الدائرة المكافئة لماكنة ذات دوار أسطواني المبينة في الشكل 3-17 لاتعطي نتائج مضبوطة ومرضية إذا تم تطبيقها للماكنة التزامنية التي لها دوار ذي أقطاب بارزة . إذ أنه في هذه الحالة الأخيرة يجب الأخذ بعين الإعتبار وجود محورين مغناطيسيين في الماكنة هما المحور العمودي والمحور الأفقي . لذلك يجب فصل التيار I والمفاعلة X إلى مركبتين تكون كل واحدة منها على محور كما سيتم مناقشة ذلك في الفقرة 3-8.

ويبين الشكل 3-18 مقطع عرضي لماكنة تزامنية بسيطة ذات دوار اسطواني موضحاً فيه المحاور المغناطيسية للأطوار الثلاثة والمحور المغناطيسي لمجال الدوار.

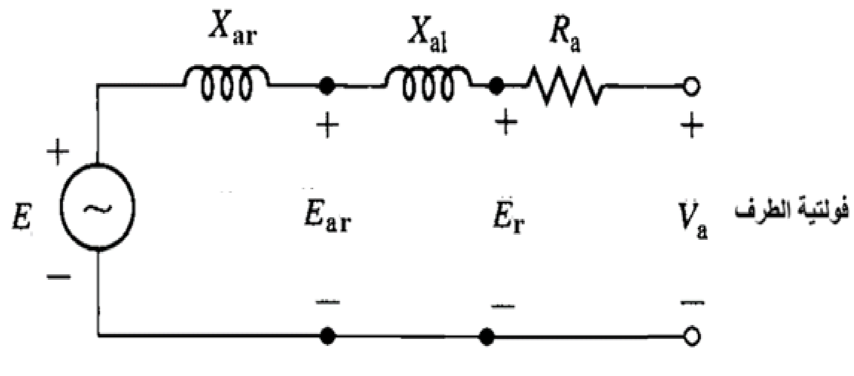


الشكل 3-18 محاور الماكنة التزامنية الرئيسية ذات الدوار الأسطواني.

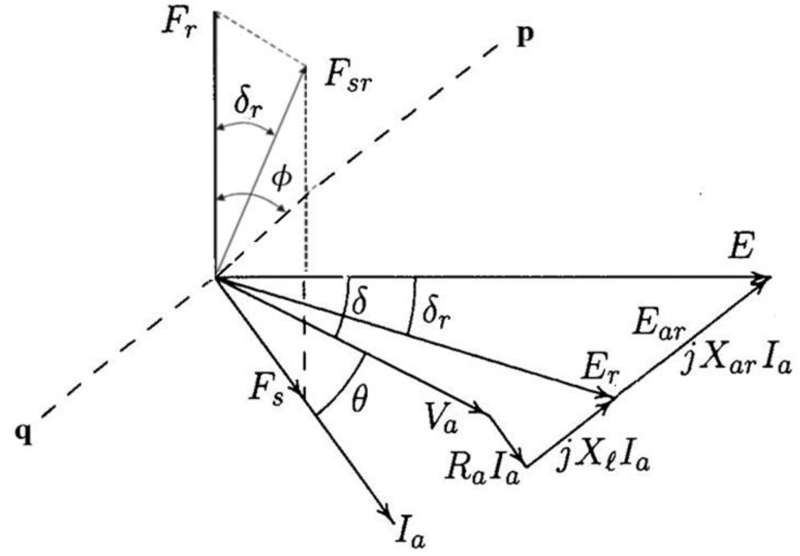
ولتحديد الدائرة المكافئة المضبوطة وليست التقريبية نجد أنه عند دوران محصلة المجال المغناطيسي في الماكنة وترابطها مع ملفات الأطوار الثلاثة في الساكن وليكن الطور a مثلاً فسوف تتولد قوة دافعة كهربائية (ق.د.ك) في موصلات الطور a ولتكن قيمتها (ج.م.ت) E ، هذه الفولتية المتولدة تختلف عن الفولتية V_a بسبب هبوط الفولتية في كل من مقاومة موصلات طور الساكن R_a والمفاعلة التسربية X_l الناتجة بسبب الجزء المتسرب من فيض الساكن الذي لايمر خلال الدائرة المغناطيسية الرئيسية ولا يترابط مع ملفات المجال لكن هذا الفيض المتسرب يترابط مع موصلات الساكن عند اطراف الملفات وحول الأخاديد. ولكون أن مسارات هذا الفيض المتسرب يكون جميعه أو جزء منه في الهواء لذلك فان X_l تكون ثابتة لأي ماكنة ، انظر الشكل 3-19. كذلك يكون هناك هبوط بالفولتية في المفاعلة التزامنية لطور الساكن X_{ar} لذا تكون الدائرة المكافئة الحقيقية المضبوطة كما مبينة في الشكل 3-20 والمخطط الطوري التابع لها في الشكل 3-21 حيث يوضح هذا الشكل أنه في اللحظة التي يكون عندها تيار الطور-a بقيمته القصوى تكون القيمة الآنية للقوة الدافعة الكهربائية المتولدة في ملفات الطور $\sqrt{2}Ecos\theta$. وفي الفترة عند اللحظة التي تولدت فيها ذروة الـ ق.د.ك في الموصل المركزي لنطاق الطور a ففي هذه الفترة نفسها يجب أن تكون محصلة الفيض ومحصلة الـ ق.د.مغ F_{sr} (التي تولد E) في الفجوة الهوائية قد دارت على هذا الموصل بزاوية فراغية نصف قطرية مقدارها $\alpha = \delta + \theta$ (أو زاوية فراغية α/P نصف قطرية لماكنة عدد أقطابها المغناطيسية $2P$).



الشكل 3- 19 توزيع الفيض المغناطيسي حول قطب بارز (المصدر: شركة جنرال الكتريك)



الشكل 3-20 الدائرة المكافئة الحقيقية المضبوطة للماكنة التزامنية .



الشكل3-21 المخطط الطوري الفراغي للفولتية والتيار والقوى الدافعة المغناطيسية لمولد غير مشبع ذي دوار اسطواني.

V = فولتية الطرف للطور
I_a = تيار الطور a للساكن
$cos\theta$ = عامل قدرة الحمل
$I_a R$ = هبوط الفولتية بسبب مقاومة طور الساكن
$I_a X_l$ = الهبوط بالفولتية بسبب المفاعلة التسربية لطور الساكن
$I_a X_{ar}$ = الهبوط بالفولتية بسبب المفاعلة التزامنية لطور الساكن
δ_r = الزاوية المحصورة بين ق.د.م الدوار ومحصلة الـ ق.د.م في الفجوة الهوائية (الزاوية بين F_r و F_{sr} الذان يدوران بسرعة تزامنية وكذلك هي الزاوية بين الفولتية E المتولدة في حالة اللاحمل والفولتية المتولدة في ملفات الساكن E_{sr}.
δ = الزاوية المحصورة بين الفولتية E وفولتية الطرف للساكن بإهمال الهبوط بالفولتية في المقاومة والمفاعلة التسربية.

ولفهم مكونات الدائرة المكافئة المضبوطة المبينة في الشكل 3-20 فأنه عند اشتغال الماكنة التزامنية في حالة الاستقرار بصفة مولد محمل بحمل كهربائي فان تيار الطور I_a سيولد قوة دافعة مغناطيسية التي بدورها تدفع فيضاً مغناطيسياً $\emptyset_a$. هذا الفيض ينقسم الى قسمين في الماكنة :

- الفيض $\emptyset_{al}$ وهو الفيض المتسرب الذي يتعشق ويترابط مع ملف الساكن فقط.
- الفيض $\emptyset_{ar}$ وهو الفيض الناتج عن عن رد فعل المنتج الذي يترابط مع ملفات المجال في الدوار وهو القسم الأعظم من $\emptyset_a$.

أما محصلة الفيض المغناطيسي $\emptyset_r$ في الفجوة ستكون عبارة عن مجموع الفيضين

$$\emptyset_r = \emptyset_f + \emptyset_{ar}$$

وكل مركبة من هذين الفيضين ستولد فولتية محتثة في ملف الساكن بموجب قانون فاراداي حيث سيولد الفيض $\emptyset_r$ فولتية E_r وسيولد الفيض $\emptyset_{ar}$ الفولتية E_{ar} كما موضح في الشكل 3-20.

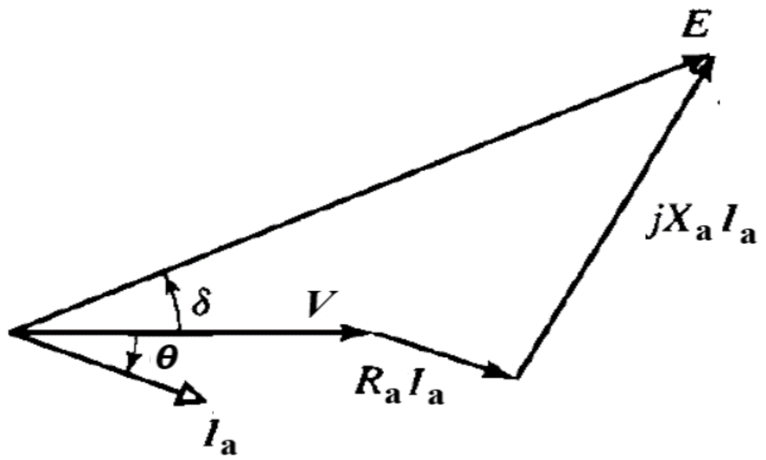
أي أن: $E = +E_r - E_{ar}$ ، لكن $-E_{ar} = jX_{ar}I_a$ فبالتعويض ينتج $E = E_r + jI_a X_{ar}$.

حيث X_{ar} هي المفاعلة الحثية الناتجة عن رد فعل المنتج . وإذا تم إضافة مقاومة ملفات الساكن لكل طور R_a والمفاعلة التسربية X_{al} إلى الدائرة فان الدائرة المكافئة في حالة الاستقرار للطور الواحد للماكنة التزامنية تكون كما مبينة في الشكل 3-20. التي فيها يمكن تبسيط المفاعلات والممانعة الكلية لها كالآتي:

مفاعلة الماكنة $X_a = X_{ar} + X_{al}$ ،

ممانعة الماكنة $Z_s = R_a + jX_s$.

ويوضح الشكل 3-22 المخطط الطوري البسيط للماكنة في حالة الاستقرار.



الشكل 3-22 المخطط الطوري البسيط للماكنة في حالة الاستقرار.

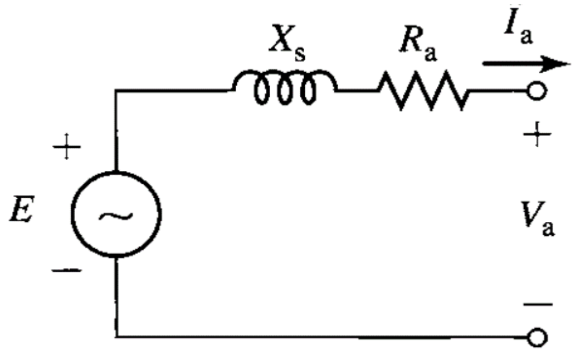
من المخطط الطوري أعلاه ، نجد أن

$$V_a + I_aR_a + jI_aX_a = |E|\angle\delta \qquad (3.29)$$

حيث δ هي الزاوية بين V_a و E وتسمى بزاوية الحمل أو زاوية الدوار Rotor angle.

θ = زاوية الممانعة Z .

كذلك يمكن تبسيط هذه الدائرة أكثر إلى الدائرة التالية المبينة في الشكل 3-23 :



الشكل 3-23 الدائرة المكافئة المبسطة.

حيث أن:

$X_s = X_a = X_{ar} + X_{al}$ هي المفاعلة التزامنية للماكنة ،

$Z_s = R_a + jX_s$ هي الممانعة التزامنية للماكنة.

وهي الدائرة نفسها التي تكلمنا عنها في الشكل 1-14 في الفصل الأول .

وتكون القدرة المركبة S التي تعطيها الماكنة على طرفها للطور الواحد :

$$S = V.I_a^* \qquad (3.30)$$

حيث I_a^* هو مترافق التيارالمركب.

بالصيغة القطبية Polar form نستطيع إعادة كتابة المعادلة كالآتي :

$$|E|\angle\delta = |V|\angle 0° + I_a|Z_s|\angle\theta \qquad (3.31)$$

حيث

$$I_a = \frac{|E|\angle\delta - |V|\angle 0°}{|Z_s|\angle\theta}$$

$$I_a^* = \frac{|E|\angle\delta + |V|\angle 0°}{|Z_s|\angle\theta}$$

عليه تكون القدرة المركبة

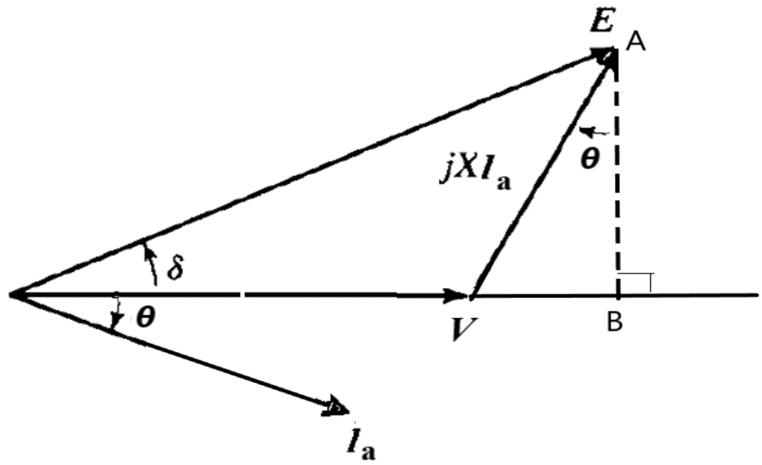
$$S = \frac{|V||E|}{|Z_s|}\{\cos(\theta - \delta) + j\ \sin(\theta - \delta)\}$$

$$- \frac{|V|.|V|}{|Z_s|}\{\cos(\theta) + j\ \sin(\theta)\} \qquad (3.32)$$

وبتفريق القسم الحقيقي عن الجزء الخيالي من المعادلة أعلاه نجد أن

$$P_e = \Re[S] \qquad\qquad Q = \mathbb{I}[S]$$

وإذا تم إهمال المقاومة R_a لكونها تكون دائماً أصغر من X_s ولتكن هذه تسميتها X فقط للسهولة بحيث تشير إلى المفاعلة التزامنية أو المفاعلة العابرة لتصبح الدائرة المكافئة أبسط ما يمكن بحيث أن المخطط الطوري يختصر إلى الشكل 3-24 .



الشكل 3-24 المخطط الطوري البسيط.

من الشكل 3-24 أعلاه :

$$|E|.\sin\delta = AB \qquad (3.33)$$

$$|I_a|.X\cos\theta = AB \qquad (3.34)$$

$$|I_a|.X\cos\theta = |E|.\sin\delta \qquad (3.35)$$

وبضرب طرفي المعادلة (3.35) بـ $|V_a|$ ينتج:

$$|V_a|.|I_a|.X\cos\theta = |V_a|.|E|.\sin\delta \qquad (3.36)$$

القدرة الفعالة المعطاة من قبل الماكنة المولدة

$$P_e = |V_a|.|I_a| \cos\theta \qquad (3.37)$$

وبتعويض المعادلة (3.37) في المعادلة (3.36) ينتج

$$P_e.X = |V_a|.|E|.\sin\delta \qquad (3.38)$$

أو

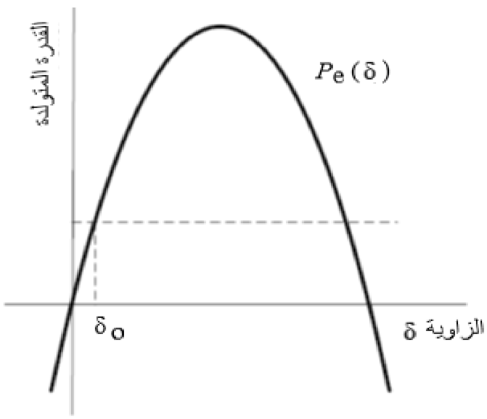
$$P_e = \frac{|V_a|.|E|}{X}.\sin\delta \qquad (3.39)$$

$$P_e = \frac{|E|.|V|}{X}\sin\delta = P_m.\sin\delta \qquad (3.40)$$

ولماكنة ذات أطوار ثلاثة تكون القدرة الفعالة الخارجة منها

$$P_e = \frac{3|E|.|V|}{X}\sin\delta = 3P_m.\sin\delta \qquad (3.41)$$

هذه المعادلة تصف العلاقة بين القدرة الفعالة P_e التي تعطيها الماكنة مع زاوية الدوار δ حيث يوضح الشكل 3- 25 كيفية تغير القدرة الفعالة مع زاوية الدوار.



الشكل 3-25 تغير القدرة الفعالة المتولدة في المولد التزامني مع زاوية القدرة.

3-8 خصائص ومميزات القدرة والعزم في الماكنة التزامنية

باهمال مفاقيد ملفات الساكن فان القدرة الخارجة من الماكنة على أطرافها سوف تساوي بالتقريب إلى القدرة المتولدة في الفجوة الهوائية . على هذا الأساس فان العزم الميكانيكي المتولد في الماكنة يكون:

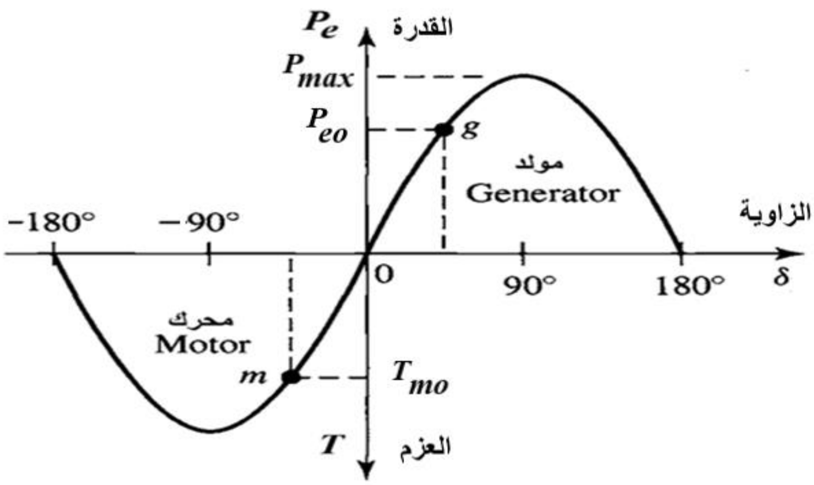
$$T = \frac{P_e}{\omega_s} = \frac{3|E|.|V|}{\omega_s X} sin\,\delta \;\; = \; T_m \, sin\,\delta \qquad (3.42)$$

حيث

$$T_m = \frac{3|E|.|V|}{\omega_s X} \qquad , \qquad \omega_s = \frac{2\pi n_s}{60}$$

n_s = السرعة التزامنية (دورة / دقيقة)

يلاحظ من المعادلات أعلاه أن قدرة الماكنة التزامنية والعزم المتولد فيها يرتبطان بمميزاتهما مع الزاوية δ كما في الشكل 3-26 ويكون تغيرهما بصيغة موجة جيبية . هذا المنحنى يسمى منحنى القدرة- الزاوية أو منحنى العزم- الزاوية.



الشكل 3-26 تغير زاوية الدوار مع القدرة أو العزم الخارجان من الماكنة التزامنية.

من الشكل 3-26 نستنتج الآتي:

- اعظم قدرة فعالة تعطيها الماكنة تحدث عندما تكون الزاوية $\delta = 90^0$ وتكون قيمتها

$$P_{max} = \frac{|V|.|E|}{X}$$

- عندما تكون الزاوية $\delta = 90^0$ وتعطي الماكنة أقصى قدرتها P_{max} عندئذ تقترب من حد الإستقرارية بصورة كبيرة ويقال في هذا الوضع إنها في حالة شد Pullout.
- عندما تصبح الزاوية $\delta > 90^0$ تفقد الماكنة حالة التزامن .
- يطلق على العزم الأقصى T_{max} بأنه عزم الشد .

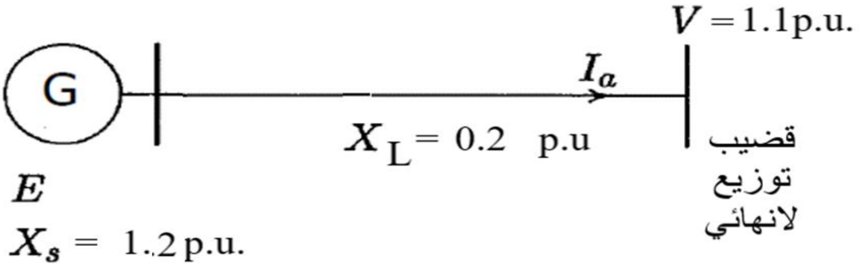
بصورة عامة يمكن تحميل الماكنة لغاية قيم P_{max} و T_{max} التي تعرف بحدود الإستقرارية الساكنة (الستاتيكية).

مثال 3-1:

مولد تزامني يجهز قدرة مقدارها S = 0.7 بنسبة الوحدة بمعامل قدرة 0.8 متأخر إلى قضيب توزيع لا نهائي فولتيته 1.1 بنسبة الوحدة . فاذا كانت مفاعلة المولد التزامنية Xs = 1.2 ومفاعلة الخط الواصل بين المولد والقضيب 0.2 بنسبة الوحدة كليهما فاحسب مقدار القدرة المجهزة من الولد إلى قضيب التوزيع واحسب أيضاً أعظم قدرة منتقلة في الحالة المستقرة.

الحل :

المنظومة مرسومة في الشكل 3-27 .



الشكل 3-27.

- التيار Ia

$$I_a = \frac{S}{V} = 0.509 - j0.382 \qquad \text{حيث} \quad V = 1.1\ p.u.$$

$$X = X_s + X_L = 1.2 + 0.2 = 1.4\ p.u.$$

$$E = V + I_a . X = 1.1 + j1.4(0.509 - j0.382)$$

$$E = 1.63 + j0.71 = 1.78\angle 23.5°$$

$$|E| = 1.78 \qquad , \qquad \delta = 23.5°$$

o القدرة المنتقلة

$$P = \frac{\lfloor E \rfloor \ . \lfloor V \rfloor}{X} \sin \ \delta \ = \frac{1.78 \times 1.1}{1.4} \sin 23.5° = 1.4 \ \sin 23.5° = 0.56 \ p.u$$

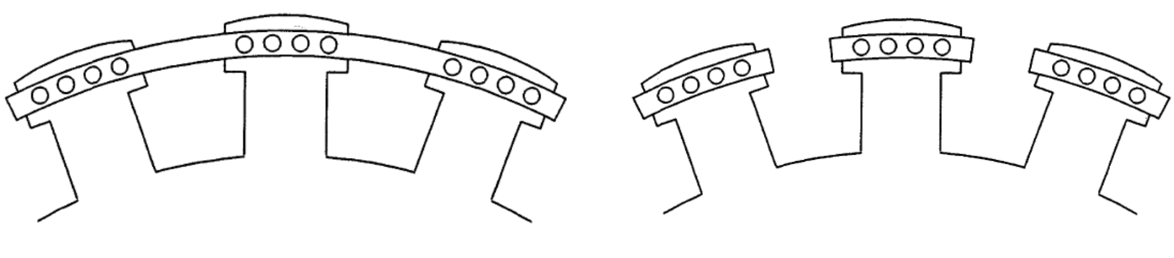
أعظم قدرة منتقلة هي

$$P = P_{max} \sin \delta \qquad \therefore \ P_{max} = 1.4 \ p.u$$

3-9 الماكنة التزامنية ذات الأقطاب البارزة

للمكائن التزامنية ذات السرع البطيئة يفضل استخدام المكائن التزامنية ذات الأقطاب البارزة الكثيرة العدد لغرض توليد الفولتية بالتردد المطلوب . وتجدر الإشارة إلى أن الدوار ذي الأقطاب البارزة والملفات المتجمعة المركزة يعطي متانة ميكانيكية أفضل في مثل هذه الحالة، حيث أن مثل هذا الدوار عادة ما يزود بملفات إخماد تسمى Amortisseurs winding وهي عبارة عن قضبان نحاسية تدفن في أوجه الأقطاب وتقصر دوائرها من الخلف بحلقات دائرية لتشبه في تكوينها القفص السنجابي للمحرك الحثي كما مبينة في الشكل 3-28. الغرض من هذه الملفات هو إخماد التذبذبات في سرعة الدوار اثناء حدوث الاضطرابات.

في الماكنة التزامنية ذات الدوارالأسطواني تكون المنافذة المغناطيسية لحزمة جزئية من الفيض التي تعبر الفجوة الهوائية ثابتة القيمة تقريباً على مدار محيط الدوار نفسه و في الأوضاع للزاوايا جميعها.عليه تكون محصلة القوة الدافعة المغناطيسية المتولدة متناسبة طردياً مع فيض الفجوة الهوائية إذا ما تم إهمال التشبع الحاصل في الأجزاء الحديدية للدائرة المغناطيسية. أما بالنسبة للماكنة ذات الأقطاب البارزة فإن



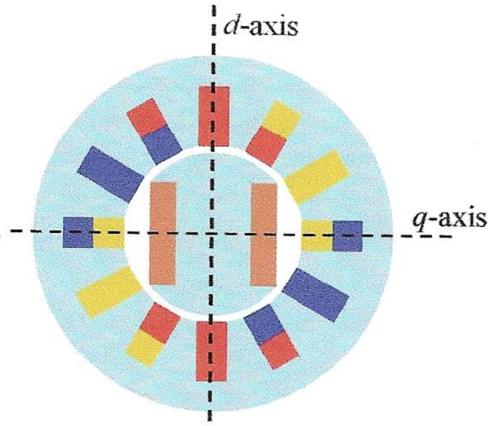
(أ) مخمدات غير مستمرة (ب) مخمدات مستمرة

الشكل3-28 تركيب دوار القطب البارز.

المنافذة المغناطيسية تتغير بالنسبة لحزمة جزئية من الفيض من قيمة عظمى على المحور المباشر للقطب إلى قيمة دنيا على المحور الذي بين الأقطاب (المحور التعامدي) حيث يكمن أطول مسار هوائي بين

الأقطابِ، لذلك عند تحليل هذا النوع من المكائن تستخدم عادة نظرية المحورين المتعامدين في كل الأحوال. هذان المحوران مبينان في الشكل 3-29 وكما يأتي:

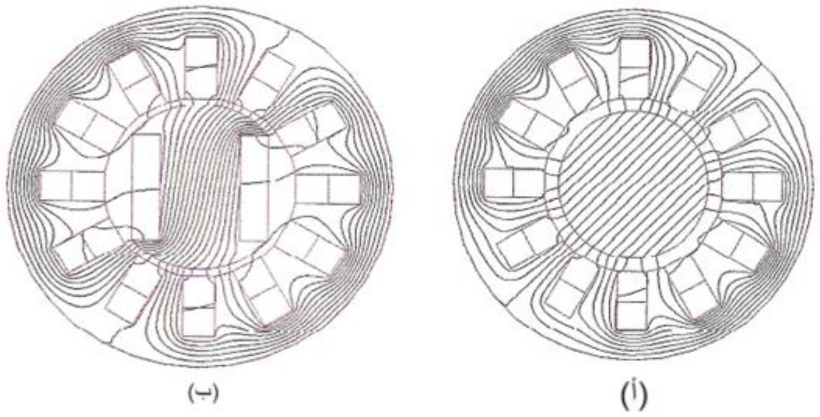
- المحور المباشر d -axis يتركز مغناطيسياً في مركز القطب الشمالي N . وهو أيضاً محور الفيض المغناطيسي الرئيسي الذي يولده تيار ملف الدوار.
- المحور التعامدي q- *axis* ويقع على زاوية 90 درجة من المحور المباشر وتكون الفجوة الهوائية أمامه أكبر وله معاوقة مغناطيسية أعلى.



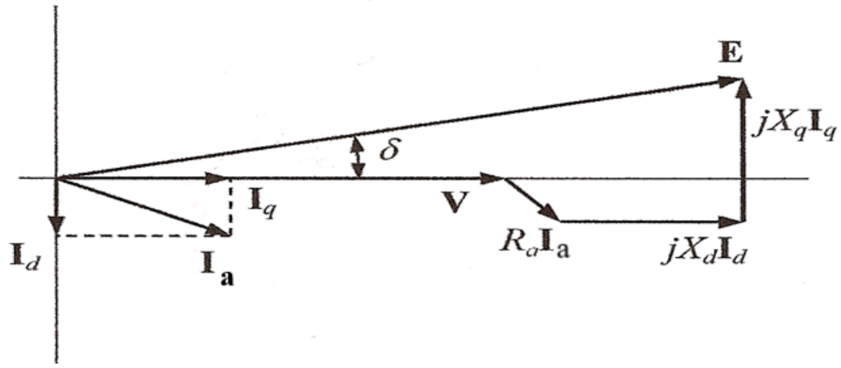
الشكل 3-29 نموذج للماكنة التزامنية ذات الاقطاب البارزة.

أما موضع الدوار بالنسبة للساكن فتحدده الزاوية ϕ بين المحور المباشر والمحور المغناطيسي لملف الطور a للساكن. هذا الإختيار مبنياً على حقيقة كون أن المحور q متقدماً على المحور d بزاوية 90 درجة وهو اختيار اعتباطي وليس فيزيائي بحت ويخضع للضوابط والأنظمة العالمية فقط. ويوضح الشكل 3-30 (أ) نمط توزيع الفيض المغناطيسي المتولد بواسطة مجموعة من التيارات في ملفات الساكن لدوار أسطواني الشكل حيث يكون محور الفيض يميل على محور الدوار بزاوية 45 درجة . كمايبين الشكل 3-30(ب) نمط توزيع الفيض المغناطيسي لنفس التيار في الماكنة التزامية ذات الأقطاب البارزة حيث يلاحظ أن تأثير بروز الأقطاب هو إزاحة فيض الساكن نحو المحور المباشر تماماً.

على هذا الأساس فانه من الممكن إجراء تحليلات الماكنة ذات القطب البارز النظرية بتحليل الفيض المغناطيسي للساكن إلي مركبتين احداهما تعمل باتجاه المحور المباشر والأخرى تعمل باتجاه المحور التعامدي وذلك بتحليل تيار الساكن I_a إلى مركبتين I_d و I_q. المركبة I_d تعمل باتجاه المحور المباشر حيث تكون المعاوقة المغناطيسية أقل ما يمكن حيث تعطي مفاعلة X_d أعلى مايمكن . المركبة I_q تعمل باتجاه المحور التعامدي حيث تكون المعاوقة المغناطيسية أكبر ما يمكن حيث تعطي مفاعلة X_q أقل مايمكن. كما موضح في المخطط الطوري في الشكل 3- 31 .



الشكل 3-30 نمط توزيع الفيض المغناطيسي (أ) في الماكنة التزامنية ذات الدوار الأسطواني ، (ب) في الماكنة التزامنية ذات الأقطاب البارزة.

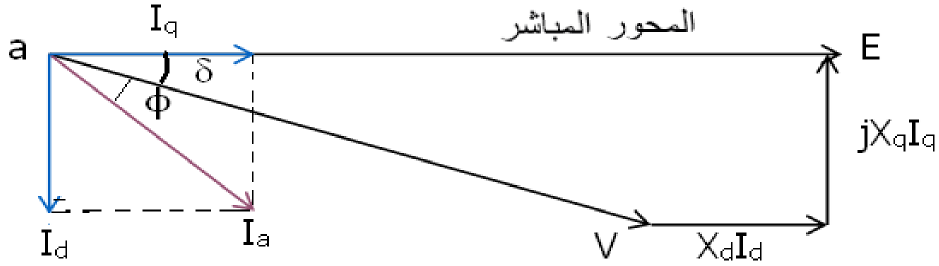


الشكل 3-31. المخطط الطوري القياسي للماكنة ذات القطب البارز .

من الشكل 3-31 أعلاه يمكن صياغة المعادلة الطورية للماكنة ذات الأقطاب البارزة كما يأتي:

$$E = V + I_a R_a + j\, I_d X_d + j I_q X_q \qquad (3.43)$$

وإذا تم إهمال مقاومة الساكن فسوف يكون المخطط الطوري للماكنة نفسها كما في الشكل 3-32.

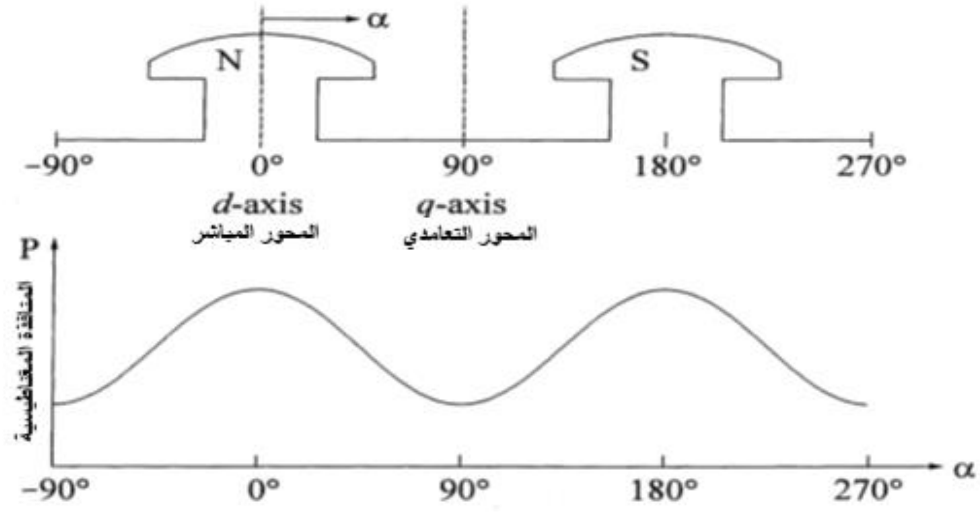


الشكل 3-32 المخطط الطوري التقريبي للماكنة ذات القطب البارز .

ولماكنة بارزة الأقطاب تكون X_d لها حوالي 0.9 بنسبة الوحدة وتكون X_q لها حوالي ثلثي هذه القيمة. بينما للماكنة التزامنية ذات الدوار الأسطواني تكون X_d بحدود 1.5 إلى 2.0 بنسبة الوحدة ، وتكون X_q حوالي 5%-10% من 1.5 بنسبة الوحدة أي أقل من هذه القيمة وذلك نتيجة الأخاديد الموجودة على محيط الدوار. هذا الإختلاف الكبير في قيم X_d و X_q في الماكنة ذات الأقطاب البارزة ناتج عن المنافذة المغناطيسية Permeance بين الأقطاب نفسها كما موضحة في الشكل 3-33 ذلك لأن الفيض المغناطيسي المتولد بواسطة ملفات الساكن يتبع مساراً خلال الحديد في الساكن ثم يعبر الفجوة الهوائية إلى الحديد في الدوار رجوعاً عبر الفجوة الهوائية إلى الساكن. إن التغير الحاصل في المنافذة المغناطيسية لهذا النوع من المكائن يمكن تمثيله رياضياً بالمعادلة :

$$P = P_0 + P_2 \cos 2\alpha$$

حيث α هي المسافة على محيط الدوار المقاسة بالزاوية (المسافة الزاوية Angular distance) من المحور المباشر d .كما موضحة في الشكل 3-33.



الشكل 3-33 تغير المنافذة المغناطيسية مع موضع الدوار لماكنة تزامنية بارزة القطب.

لإيجاد معادلة للقدرة الخارجة لمولد ذي قطب بارزوذي مقاومة مهملة لملفات الساكن بالمقرنة مع مفاعلته التزامنية يمكن أن تستخرج من المخطط الطوري المبين في الشكل 3-32 وكما يأتي:

$$I_a \cos \emptyset = I_q \cos \delta + I_d \sin \delta$$

$$V \cos \delta = E - I_d X_d \; \& \qquad V \sin \delta = I_q X_q$$

ومعادلة القدرة يمكن كتابتها كالآتي

$$P = V\left(I_q \cos\delta + I_d \sin\delta\right)$$

$$= V\left(\frac{V\sin\delta}{X_q}\cos\delta + \frac{(E - V\cos\delta)}{X_d}\sin\delta\right)$$

وباعادة ترتيب حدود المعادلة أعلاه وتبسيطها نحصل على

$$P = \frac{VE}{X_d}sin\delta + \frac{V^2(X_d - X_q)}{2X_dX_q}sin2\delta \qquad (3.44)$$

يجب أن يلاحظ أن المولد ذا القطب البارز يكون « أكثر ثباتاً » من المولد ذي الدوار الأسطواني لأن الاول يشتغل بزاوية حمل أقل لحمل معين . معامل القدرة التزامني هو

$$P_s = \frac{VE_o}{X_d}cos\delta + \frac{V^2(X_d - X_q)}{X_dX_q}cos2\delta \qquad (3.45)$$

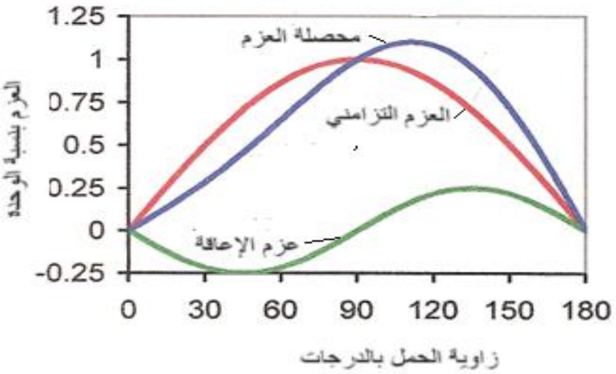
القيمة القصوى للقدرة P تحدث عندما $P_s = 0$ ولهذا ستكون $\delta < 90°$

أما العزم المتولد في الماكنة التزامنية ذات الأقطاب البارزة ذات الأطوار الثلاثة فيكون:

$$T_d = \frac{3}{\omega_s}\left[\frac{VE}{X_d}sin\delta + \frac{V^2(X_d - X_q)}{2X_dX_q}sin2\delta\right] \qquad (3.46)$$

حيث ω_s هي السرعة التزامنية للماكنة.

ويمثل الحد الأول من المعادلة (3.46) العزم التزامني للماكنة Synchronous torque ، أما الحد الثاني منها فيمثل مركبة العزم الناتجة عن تأثير البروزية في الدوار وتسمى بعزم الإعاقة Reluctance torque والذي يختفي نهائياً في الدوار الأسطواني لكون أن المفاعلتين X_d و X_q تكونان متساويتان في القيمة. ويبين الشكل 3-34 مركبات العزم المذكورة.



الشكل 3-34.

الفصل 4 ديناميكية الماكنة التزامنية ومعادلة التأرجح

DYNAMICS OF THE SYNCHRONOUS MACHINE AND THE SWING EQUATION

4-1 مقدمة

كما هو معروف فان منظومة القدرة تحتوي على اعداد كبيرة من محطات توليد الطاقة مرتبطة مع بعضها البعض . وكل محطة تحتوي على أعداد معينة من المولدات التزامنية التي تشتغل مع بعضها على التوازي. ولأغراض دراسة الإستقرارية فان المكائن التزامنية كلها في أية محطة من محطات التوليد سوف يتم التعامل معها وكانها ماكنة واحدة مكافئة . بهذه الطريقة فان المنظومة التي تحتوي على مكائن متعددة كثيرة سوف تقلص إلى منظومة ذات مكائن مكافئة قليلة يمكن التعامل معها بطريقة أسهل بكثير.

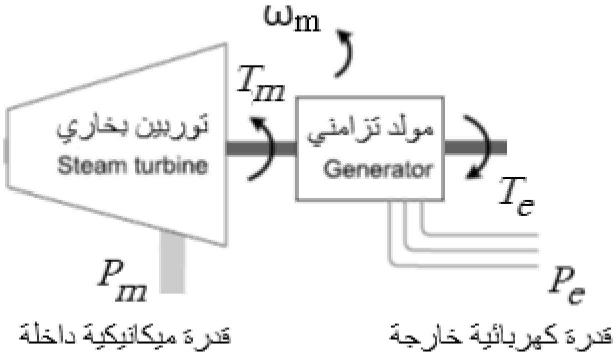
بما أن مسائل الإستقرارية لها صلة وثيقة بالحركة الدورانية لدوار الماكنة التزامنية فان الميكانيك الدوراني يكون ذا أهمية كبيرة في دراسة الإستقرارية ، لذلك لابد من التذكير بالقوانين والمعادلات الخاصة بالميكانيك الدوراني ومقارنته بالميكانيك الخطي حيث يبين الجدول 4-1 القوانين والعلاقات الخاصة بكليهما.

الجدول 4-1 القوانين والعلاقات

Rotation الميكانيك الدوراني			Linear Motion الميكانيك الخطي		
الوحدة MKS	الرمز أو المعادلة	الكمية	الوحدة MKS	الرمز أو المعادلة	الكمية
radian (rad)	θ	الإزاحة الزاوية	meter (m)	s	الطول/المسافة
kg·m²	$J=\int r^2 dm$	عزم القصور الذاتي	kilogram (kg)	M	الكتلة
rad/s	$\omega=d\theta/dt$	السرعة الزاوية	meter/second (m/s)	$v=ds/dt$	السرعة
rad/s²	$\alpha=d\omega/dt$	التسارع الزاوي	m/s²	$a=dv/dt$	التسارع
newton-meter (N·m) or J/rad	$T=J\alpha$	العزم	newton (N)	$F=Ma$	القوة
J, or W·s	$W=\int T d\theta$	الشغل	joule (J)	$W=\int F ds$	الشغل
W	$p=dW/dt$ $=T\omega$	القدرة	watt (W)	$p=dW/dt$ $=Fv$	القدرة

4-2 العلاقات الكهروميكانيكية في الماكنة التزامنية

تأمل الآن ماكنة مفردة تحتوي على مدور أساسي عبارة عن توربين بخاري ومولد تزامني كما في الشكل 4-2 .



الشكل 4-2 ماكنة مفردة (وحدة توليد واحدة).

العلاقات الميكانيكية في هذه المنظومة هي كالآتي:

- الطاقة الحركية W_k في دوار المولد التزامني تكون

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 \qquad (4.1)$$

حيث : J هو عزم القصور الذاتي الكلي (لدوار المولد + المدور الأساسي المربوط معه) بالكيلوغرام . متر^2 ($kg.m^2$).

ω_m السرعة الزاوِيَة الميكانيكية للدوار.

- الزخم الزاوي للدوار

$$M = J\omega_m \qquad (4.2)$$

ويرتبط Mبالطاقة الحركية للكتل الدوارة W_k ، خاصة دوار المولد التزامني ، بالعلاقة

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m \qquad (4.3)$$

من هذه المعادلة يمكن أن نعبر عن قيمة الزخم الزاوي

$$M = \frac{2W_k}{\omega_m} \qquad (4.4)$$

- ثابت القصور الذاتي H

في دراسات الإستقرارية لمنظومات القدرة الكهربائية وخاصة ما يتعلق بالحركة الديناميكية للمكائن التزامنية فان جميع المعادلات في الجدول 4-1 يتم تحويلها إلى معادلات طبيعية Normalized بدلالة الثابت H. هذا الثابت يسمى "ثابت القصور الذاتي" وعادة ما يحسب بنسبة الوحدة p.u.

ويعرف الثابت H بوصفه الطاقة الحركية (واط . ثانية) عند السرعة المقررة (التزامنية) مقسوم على الفولت أمبير الأساس VA_{base}. أي أن

$$H = \frac{\text{الطاقة الحركية المخزونة(واط.ثانية)}}{\text{تقنين الماكنة(فولت.أمبير)}} = \frac{W_k}{G} \qquad (4.5)$$

حيث G هو تقنين الماكنة بالفولت أمبير.

لذا فالمعادلة (4.5) يمكن أن تكتب

$$W_k = H.G$$

$$= \frac{1}{2} M\omega_m \qquad (4.6)$$

من هذه المعادلة يمكن استنباط العلاقة بين M و H و G كالآتي

$$M = \frac{2.G.H}{\omega_m} = \frac{2.G.H}{2.\pi.f} = \frac{G.H}{\pi.f} \qquad (4.7)$$

وباستخدام مصطلح ω_{ms} للدلالة على السرعة الزاوية التزامنية المقررة بالدرجات النصف قطرية لكل ثانية (rad/s) فيكون ثابت عزم القصور الذاتي بنسبة الوحدة :

$$H = \frac{1}{2}\frac{J\omega_{ms}^2}{VA_{base}} \qquad (4.8)$$

ولتبسيط المعادلات بصورة عامة فيعتبر M ثابتاً ويتم حسابه في السرعة التزامنية للماكنة ذلك لأن السرعة التزامنية للماكنة لا تتغير كثيراً قبل أن تفقد الماكنة استقراريتها أي أن :

$$M = \frac{2W_k}{\omega_{sm}} \qquad (4.9)$$

والكمية $\frac{W_k}{S_{base}}$ هي في الحقيقة ثابت القصور الذاتي H المحسوب بنسبة الوحدة كما ذكر سلفاً. ويبين الجدول 4-2 بعض القيم النموذجية للثابت H للفائدة والمقارنة.

الجدول 4-2 : قيم نموذجية للثابت H .

نوع الماكنة	الثابت H (مليون جول/ مليون فولت أمبير) (MJ/ MVA)
مولد – توربيني	3.9
مولد ذو دولاب- مائي (هايدروليكي)	2.4
مكثف تزامني	1.25 – 1
محرك تزامني	2

ولأغراض دراسات الإستقرارية فان محطة توليد واحدة تحتوي على عدة وحدات توليدية يمكن أن تمثل بوحدة توليد واحدة مكافئة في تقنين قدرتها لمجموع قدرات وحدات التوليد الإنفرادية وكأن هذه الوحدات تعمل تعمل سوية خلال الفترة العابرة. في هذه الحالة سيكون عزم القصور الذاتي المكافئ J_{eq} هو مجموع عزوم القصور الذاتية للوحدات جميعها ، أي أن

$$J_{eq} = J_1 + J_2 + \ldots + J_n \qquad (4.10)$$

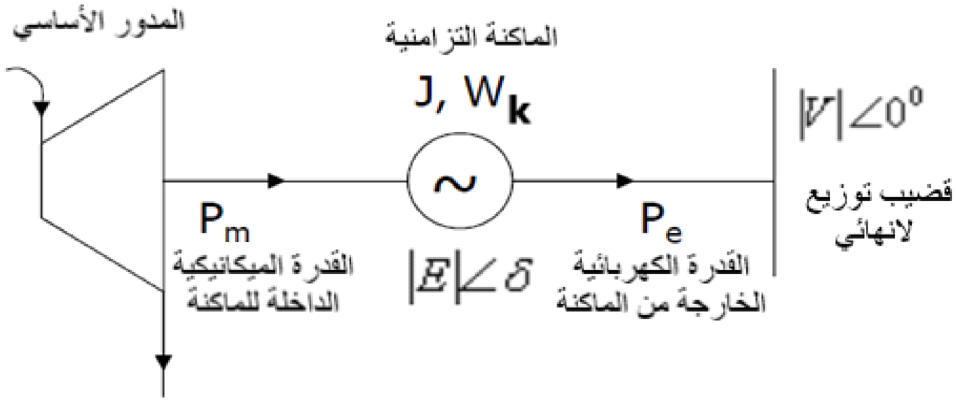
وهذا ينطبق على الزخم الزاوي ، لذا نستطيع أن نكتب

$$M_{eq} = M_1 + M_2 + \ldots + M_n \qquad (4.11)$$

4-3 معادلة التأرجح للمولد التزامني

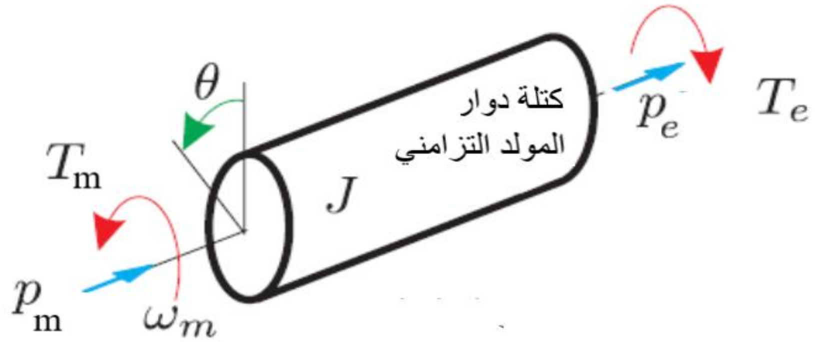
4-3-1 حالة الماكنة المفردة

لنتأمل الآن الماكنة التزامنية المفردة التي تم تمثيلها سلفاً في الشكل 4-1 وقد ربطت إلى قضيب توزيع لا نهائي Infinite busbar كما في الشكل 4-3. ويقصد بقضيب التوزيع اللانهائي هو ذلك القضيب المربوط ضمن شبكة منظومة كبيرة تشتغل تحت ظروف متوازنة ومستقرة بحيث أنه إذا ربطت إليه ماكنة تزامنية فان هذا القضيب لا يتأثر (ظاهرياً) بأي شكل من الأشكال بالتغير الذي يحصل في دائرة الإثارة المغناطيسية أو التحميل للماكنة التزامنية (إذا كانت تعمل كمولد تزامني)، وعليه يشار إلى أن هذه الماكنة مربوطة إلى قضيب توزيع لانهائي .



الشكل 4-3 ماكنة مفردة مربوطة إلى قضيب توزيع لا نهائي.

كذلك تأمل الشكل 4-4 الذي يبين كتلة دوار الماكنة التزامنية (المولد) المفردة أعلاه لكي نستنتج علاقات العزوم والسرع والتسارع لهذه الكتلة أثناء حركتها وأثناء تعرضها للإضطرابات المختلفة.



الشكل 4-4 كتلة دوار الماكنة التزامنية المفردة المعطى في الشكل 4-1.

في هذا الشكل 4-4 ، يكون التسارع (التعجيل) الزاوي لكتلة الدوار α معطى بالمعادلة التالية :

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \qquad (4.13)$$

إن حركة دوار الماكنة التزامنية يخضع لقانون نيوتن الثاني حيث يمكن كتابة عزم التسارع الزاوي لحركة الدوار بالصيغة الآتية

$$T_{acc} = J\alpha = J\frac{d\omega}{dt} = J\frac{d^2\theta}{dt^2} \qquad (4.14)$$

كذلك فان عزم التسارع الزاوي هو حاصل فرق العزم الميكانيكي الداخل للماكنة مع العزم الكهرومغناطيسي المتولد فيها ، أي أن

$$T_{acc} = J\frac{d^2\theta}{dt^2} = T_m - T_e \qquad (4.15)$$

في هذه المعادلة θ هي الإزاحة الزاوية للدوار ؛ T_{acc} هو عزم التسارع ؛ T_m هو العزم الميكانيكي المسلط من قبل المدور الأساسي و T_e هو العزم الكهرومغناطيسي المتولد في الماكنة التزامنية.

بضرب كلا طرفي المعادلة (4.15) بالسرعة الزاوية ω ينتج

$$J.\omega\frac{d^2\theta}{dt^2} = T_{ac}.\omega = T_m.\omega - T_e.\omega \qquad (4.16)$$

في هذه المعادلة ، إذا جعلنا (عرَفنا)

$J.\omega = M$ الزخم الزاوي .

$T_{ac}.\omega = P_{acc}$ قدرة التسارع .

$T_m.\omega = P_m$ القدرة الداخلة من المدور الإبتدائي ؛

$T_e.\omega = P_e$ القدرة المتولدة من المولد التزامي وتساوي القدرة الخارجة من المولد نفسه عندما يتم فرض إهمال المفاقيد.

وباستعمال التعاريف أعلاه يمكن كتابة المعادلة (4.16) كالآتي

$$M\frac{d^2\theta}{dt^2} = P_{acc} = P_m - P_e \qquad (4.17)$$

لما كانت الإزاحة الزاوية للدوار θ تتغير مع الزمن ، لذا يمكن كتابة معادلة تغيرها كالآتي

$$\theta = \omega_{ms}.t + \delta \qquad (4.18)$$

حيث

ω_{ms} : السرعة التزامنية للمولد ؛

δ : الإزاحة الزاوية للدوار التي تقاس نسبة إلى المحور المرجع الذي يدور بالسرعة التزامنية ، وتسمي عادة بزاوية الدوار أو زاوية القدرة أو زاوية العزم.

بأخذ التفاضل مرتين للمعادلة (4.18) أعلاه ينتج

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_{ms} + \frac{d\delta}{dt}$$

$$\frac{d2\theta}{dt^2} = \frac{d2\delta}{dt^2} \quad (4.19)$$

وبتعويض المعادلة (4.19) بالمعادلة (4.17) ينتج

$$M\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{acc} = P_m - P_e \quad (4.20)$$

هذه المعادلة التفاضلية غير الخطية من الدرجة الثانية تعطي وصفاً ديناميكياً لحركة المولد التزامني ويطلق عليها عادة بمعادلة التأرجح The swing equation . كذلك يطلق عليها أيضاً بمعادلة الحركة للماكنة التزامنية الدوارة Equation of motion. وندرج في أدناه بعض الملحوظات المهمة حول هذه المعادلة :

- معادلة التأرجح هي معادلة تفاضلية غير خطية من الدرجة الثانية بامتياز. وسبب ذلك يعود إلى أن القدرة الكهربائية الذي يولدها المولد التزامني وكذلك قدرة التسارع كليهما يكونان دالة للزاوية δ .
- السبب الثاني هو أن الزخم الزاوي M لا يكون ثابتاً تماماً ، لكنه يؤخذ عادة كونه ثابت لأن حل المعادلة التفاضلية يجري خلال فترة زمنية قصيرة جداً (بحدود ثانية واحدة أو أقل) ، هذه الفترة القصيرة يكون التغير في السرعة الزاوية ω_{ms} خلالها للدوار صغير جداً بحيث يهمل عادة.

4-3-2 الصيغة الميكانيكية والصيغة الكهربائية لمعادلة التأرجح

إن المعادلة (4.7) يمكن إعادة كتابتها بنسبة الوحدة كالآتي

$$M = \frac{G.H}{\pi.f} = \frac{2.H}{2.\pi.f} \times \frac{G}{G} = \frac{2.H}{\omega_m} \quad \text{بنسبة الوحدة} \quad (p.u.)$$

لكن العلاقة بين التردد الزاوي الكهربائي والميكانيكي ، كما تم مناقشته في الفصل الثالث هو

$$f_e = \frac{P}{2}f_m$$

أو

$$2\pi f_e = \frac{P}{2}2\pi f_m$$

أي أن

$$\omega_e = \frac{P}{2}\omega_m \quad (4.21)$$

بذلك تكون معادلة التأرجح بالصيغة الكهربائية

$$\frac{2\,.H}{\omega_e}\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{acc} = P_m - P_e \qquad (4.22)$$

وتكون معادلة التأرجح بالصيغة الميكانيكية

$$\frac{2.H}{\omega_m} \times \frac{2}{P} \times \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{acc} = P_m - P_e \qquad (4.23)$$

مثال 4-1 :

مولد تزامني توربيني ذي قطبين 2- p، 50 هرتز ، MVA60 له عزم قصور ذاتي $J = 9 \times 10^3$ كيلو غرام . متر^2 . احسب الآتي :

(أ) الطاقة الحركية للمولد بملايين الجولات MJ إذا كان المولد يدور بالسرعة المقننة.

(ب) ثابتا القصور الذاتي H و M .

(جـ) الثابت M على قدرة أساس مقدارها MVA50 .

الحل:

(أ) سرعة الماكنة

$$n = \frac{120f}{P} = \frac{120 \times 50}{2} = 3000\ \ rpm$$

الطاقة الحركية المخزونة في دوار الماكنة

$$W_k = \frac{1}{2}J\omega_m^2 = \frac{1}{2} \times 9 \times 10^3 \times (100\pi)^2 = 444 \times 10^6 \text{ جول} = 444\ MJ$$

(ب) الثابت H :

$$H = \frac{\text{الطاقة الحركية المخزونة(واط.ثانية)}}{\text{تقنين الماكنة(فولت.أمبير)}} = \frac{W_k}{G} = \frac{444}{60} = 7.4\ \ MJ/MVA$$

الثابت M بالدرجات الكهربائية :

$$M = \frac{2.G.H}{\omega_m} = \frac{G.H}{\pi.f} = \frac{60 \times 7.4}{180 \times 50}$$

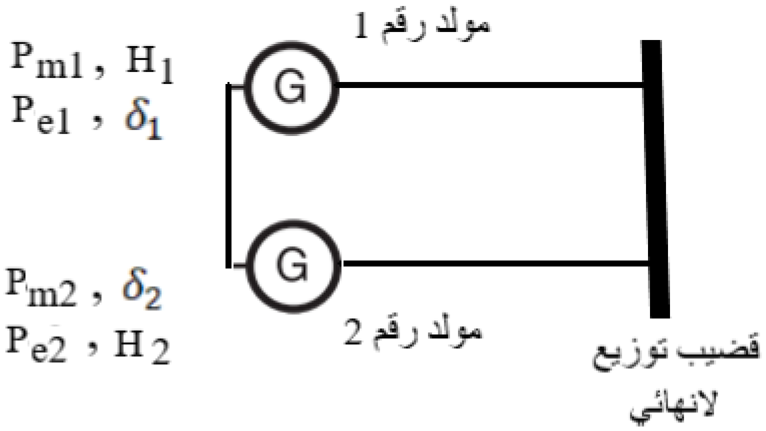
$$= 0.0495 \;\; MJ.s/elctrial\ degrees$$

(جـ) الثابت M بنسبة الوحدة:

$$P.u. \qquad M = \frac{M}{MVA_{base}} = \frac{0.0495}{60} = 8.25 \;\times 10^{-4} \;\; p.u.$$

4-4منظومة ذات ماكنتين Two- Machine System

لندرس الآن منظومة تحتوي على ماكنتين مربوطتين إلى قضيب توزيع لانهائي كما في الشكل 4-5.



الشكل 4-5 منظومة ذات ماكنتين

معادلتا التأرجح لكلا الماكنتين بنسبة الوحدة محسوبتين على الأساس نفسه :

$$\frac{2.H_1}{\omega_e}\frac{d^2\delta_1}{dt^2} = P_{m1} - P_{e1} \qquad p.u \qquad (4.24)$$

$$\frac{2.H_2}{\omega_e}\frac{d^2\delta_2}{dt^2} = P_{m2} - P_{e2} \qquad p.u \qquad (4.25)$$

في هذه المنظومة هناك احتمالين لحالتي الماكنتين :

1. إما أن تتأرجح الماكنتان سوية أي $\delta = \delta_2 = \delta_1$ في هذه الحالة يطلق على الماكنتين بانهما ماكنتان متماسكتان Coherent . عليه تكون معادلة التأرجح لكليهما :

$$\frac{2.H_1}{\omega_e}\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{m1} - P_{e1} \qquad p.u \tag{4.26}$$

$$\frac{2.H_2}{\omega_e}\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{m2} - P_{e2} \qquad p.u \tag{4.27}$$

بجمع (4.26) مع (4.27) ينتج

$$\frac{2(H_1 + H_2)}{\omega_e}\frac{d^2\delta}{dt^2} = (P_{m1} + P_{m2}) - (P_{e1} + P_{e2})$$

أو

$$\frac{2(H)}{\omega_e}\frac{d^2\delta}{dt^2} = (P_m) - (P_{e1}) \tag{4.28}$$

حيث $H = H_1 + H_2$ وهو ثابت العزم المكافئ

2. أو أن الماكنتين لا تتأرجحان سوية $\delta_2 \neq \delta_1$ ويطلق عليهما في هذه الحالة بانهما ماكنتان غير متماسكتان Noncoherent . لذا فانه بطرح المعادلتين (4.24) و (4.25) من بعضهما ينتج

$$\frac{d^2\delta_1}{dt^2} - \frac{d^2\delta_2}{dt^2} = \frac{2}{\omega_e}\left\{\frac{P_{m1} - P_{e1}}{H_1} - \frac{P_{m2} - P_{e2}}{H_2}\right\} \tag{4.29}$$

بضرب طرفي المعادلة (4.29) بالكمية $\frac{H_1H_2}{H_1+H_2}$ وإعادة ترتيبها

$$\frac{2}{\omega_e}\left(\frac{H_1H_2}{H_1+H_2}\right)\frac{d^2(\delta_1 - \delta_2)}{dt^2} = \frac{P_{m1}H_2 - P_{m2}H_1}{H_1+H_2} - \frac{P_{e1}H_2 - P_{e2}H_1}{H_1+H_2}$$

أو بصيغة أبسط

$$\frac{2}{\omega_e}H_{12}\frac{d^2\delta_{12}}{dt^2} = P_{m12} - P_{e12} \tag{4.30}$$

حيث $\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2$ هي الزاوية النسبية و $H_{12} = \frac{H_1H_2}{H_1+H_2}$ هو ثابت القصور الذاتي المكافئ

والذي فيه يجب أن يكون H_1 و H_2 كليهما محسوبان على الأساس نفسه.

مثال 4-2 :

مولدان تزامنيان مربوطان على التوازي في محطة التوليد نفسها لهما المواصفات الآتية:

المولد رقم 1 :

500MVA, 0.85 p.f. , 20kV , 3500 r.p.m. , 50 Hz , H_1= 4.8 MJ/MVA

المولد رقم 2 :

750MVA, 0.90 p.f. , 20kV , 1500 r.p.m. , 50 Hz , H_2= 3.2 MJ/MVA

احسب الثابت H المكافئ للمولدان أعلاه على أساس *100* MVA.

الحل : الطاقة الحركية الكلية للمولدان :

$$W_k = W_{k1} + W_{k2} = H_1 G_1 + H_2 G_2 = 4.8 \times 500 + 3.5 \times 750$$

$$W_k = 2400 + 2625 = 5025\ MJ = H_{eq} G_{base}$$

5-4 الزخم الزاوي المكافئ *M* لماكنتين

للمنظومة ذات الماكنتين التي في الشكل 4-5 :

$$M_1 \frac{d^2\delta_1}{dt^2} = P_{m1} - P_{e1} = \Delta P_1 \qquad (4.31)$$

$$M_2 \frac{d^2\delta_2}{dt^2} = P_{m2} - P_{e2} = \Delta P_2 \qquad (4.32)$$

في هذه الحالة لدينا أيضاً إحتمالان:

1. تتأرجح الماكنتان سوية أي $\delta = \delta_2 = \delta_1$ أي أنهما متماسكتان ، فبجمع المعادلتين أعلاه ينتج :

$$(M_1 + M_2) \frac{d^2\delta}{dt^2} = \Delta P_1 + \Delta P_2 \qquad (4.33)$$

$$M_{eq}\frac{d^2\delta}{dt^2}=\Delta P_{eq}$$

إي أن الزخم الزاوي المكافئ هو

$$M_{eq}=M_1+M_2 \tag{4.34}$$

6-4 منظومة ذات مكائن عديدة Muli-Machine System

لأغراض دراسات الإستقرارية فان محطة توليد حاوية على عدة مكائن تزامنية يمكن تمثيلها بماكنة مكافئة واحدة . هذه الماكنة المكافئة يمكن اعتبارها وكأن تقنينها يساوي مجموع تقنينات المكائن جميعها واعتبارها وكأنها تعمل لمفردها خلال الفترة العابرة واعبارها أيضاً كمكائن متماسكة جميعها. لذلك فاذا كان لدينا n عدد من المكائن في محطة التوليد فستكون تقنين أو سعة الماكنة المكافئة :

$$G_{eq}=G_1+G_2+G_3+\cdots\ldots\ldots\ldots\ldots.+G_n \tag{4.35}$$

وكذلك فان عزم القصور الذاتي المكافئ لهذه الماكنة يكون حاصل جمع عزم القصور الذاتي لجميع المكائن المنفردة .

$$J_{eq}=J_1+J_2+J_3+\cdots\ldots\ldots\ldots\ldots.+J_n \tag{4.36}$$

وهذا السياق ينطبق أيضاً على الزخم الزاوي للماكنة المكافئة ، أي أن

$$M_{eq}=M_1+M_2+M_3+\cdots\ldots\ldots\ldots\ldots.+M_n \tag{4.37}$$

أما الثابت H_{eq} المكافئ فيمكن أيجاده من قانون الطاقة الحركية

$$\begin{aligned}W_k&=G_{eq}H_{eq}\\&=G_1H_1+G_2H_2+G_3H_3\\&\quad+\cdots\ldots\ldots..+G_nH_n\end{aligned}$$

أو أن

$$H_{eq}=H_1\frac{G_1}{G_{eq}}+H_2\frac{G_2}{G_{eq}}+H_3\frac{G_3}{G_{eq}}+\cdots\ldots\ldots\ldots..+H_n\frac{G_n}{G_{eq}} \tag{4.38}$$

مثال 4-3 :

مولد تزامني مربوطان على التوازي له المواصفات الآتية:

200MVA, 11kV , 50 Hz, 4-pole , H = 6 MJ/MVA

(أ) جد كمية الطاقة المخزونة في الدوار عند السرعة التزامنية؛

(ب) الماكنة كانت تعمل بحمل *120* MVA وفجأة ازداد الحمل الى *160* MVA ، احسب مقدار التباطئ في سرعة الدوار، اهمل المفاقيد جميعها.

(جـ) لو افترضنا أن التباطئ في السرعة الذي تم حسابه في (ب) إعلاه بقي لفترة 5 دورات ، جد مقدار التغير في زاوية الدوار وسرعته محسوبة بالدورة لكل دقيقة في نهاية الفترة المذكورة.

(د) إذا تم ربط مولد ثاني ليعمل على التوازي مع المولد أعلاه بالمواصفات الآتية:

150 MVA, 11kV , 50 Hz, 300 r.p.m , H = 4 MJ/MVA

إحسب مقدار ثابت القصور الذاتي المكافئ H_{eq} لكلا المولدين على أساس *100* MVA .

الحل :

(أ) الطاقة الحركية المخزونة في الدوار

$$GxH = 200\times 6 = 1200 \ \ MJ$$

(ب) قدرة التسارع P_{acc}

$$P_{acc} = P_{m2} - P_{m1} = 120 - 160 = \ -40 \ MW$$

$$M = \frac{G.H}{180f} = \frac{1200}{180 \times 50} = \frac{2}{15} MJ.s/elect.degrees$$

لكن $P_{acc} = \ \alpha M$ أي أن:

$$-40 = \frac{2}{5} \times \alpha \qquad \therefore \alpha = -300 \ \ elect.degrees/s^2$$

هنا α هو سالب الإشارة وهذا معناه أن دوار الماكنة يتباطأ في الحركة.

(جـ) إن الفترة الزمنية لـ 5 دورات لتردد 50 هرتز هي

$$t = \frac{1}{f} \times 5 = \frac{1}{50} \times 5 = 0.1\ s$$

التغير في زاوية الدوار يمكن إيجادها من المعادلة (4.19)

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d^2\delta}{dt^2} = \alpha$$

بأخذ التكامل للمعادلة أعلاه بعد تعويض $dt^2 = tdt$ نحصل على

$$\int \frac{d^2\delta}{dt^2} = \int \alpha$$

$$\int d^2\delta = \int \alpha . tdt$$

ويكون التغير في الزاوية δ

$$d\delta = \frac{1}{2} t^2 \alpha$$

$$d\delta = \frac{1}{2} \times 0.1^2 \times (-300) = -1.5\ degrees$$

(جـ) بالنسبة للمكائن الكهربائية :

1^o درجة كهربائية = $(P/2)^o$ درجة ميكانيكية

دورة ميكانيكية واحدة = $\frac{P}{2} \times 360$ درجة كهربائية ،

1^o درجة كهربائية لكل ثانية =

$$\frac{1}{360} \times \frac{2}{P}$$

دورة ميكانيكية لكل ثانية

1^o درجة كهربائية لكل دقيقة = $\frac{1}{360} \times \frac{2}{P} \div \frac{1}{60} = \frac{1}{3P}$ دورة ميكانيكية لكل دقيقة

الآن من العلاقات أعلاه يمكن تحويل التسارع إلى سرعة بالدورة لكل دقيقة كما يأتي

$$\alpha_{rpm} = (-300) \times \frac{1}{3P} = (-300) \times \frac{1}{3 \times 4} = -25\ rpm$$

سرعة الماكنة (الدوار) التزامنية

$$n_s = \frac{120f}{P} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500\ rpm$$

بذلك تكون سرعة الدوار بعد انقضاء فترة 5 دورات

$$n_r = n_s + \alpha_{rpm} t$$

$$n_r = 1500 + (-25)(0.1) = 1497.5\ rpm$$

(د) ثابت القصور الذاتي المكافئ H_{eq} لكلا المولدين على أساس 100 MVA يكون باستخدام المعادلة (4.38)

$$H_{eq} = H_1 \frac{G_1}{G_{eq}} + H_2 \frac{G_2}{G_{eq}}$$

$$H_{eq} = 6 \times \frac{200}{100} + 4 \times \frac{150}{100} = 18 \ MJ/MVA$$

الفصل 5 اشتغال الماكنة التزامنية تحت الظروف العابرة

5-1 مقدمة

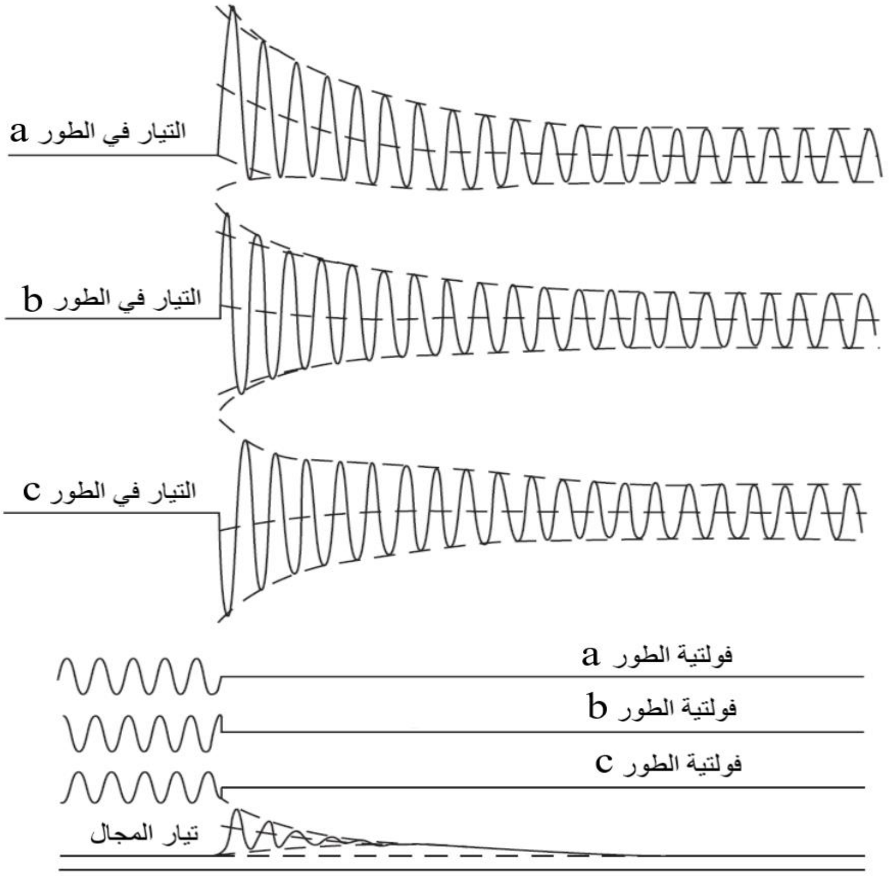
من أقسى الظروف العابرة غير الطبيعية التي يتعرض لها المولد التزامني هي أن يحصل عطل قصر دائرة قريب جداً من أطرافه الخارجية. في هذه الحالة ستكون تيارات الأطوار الثلاثة وفولتيات الأطوار في الساكن وتيار المجال في الدوار كما موضحة جميعها في الشكل 5-1. أما إذا أخذ تيار الطور a فقط لغرض التأمل والدراسة لمراحله المتعددة خلال فترة القصر والموضح مخططه الذبذبي في الشكل 5-2 فإن هذا التيار غير الطبيعي سيمر بثلاث فترات زمنية قصيرة جداً لا تتعدى بضع ثوان:

- الفترة دون العابرة Sub-transient period : وهي الفترة الزمنية للدورة الأولى لتيار العطل أو بعدها بقليل بعد حدوث العطل مباشرة ، وهنا يكون التيار المتناوب كبير جداً ويهبط بسرعة.
- الفترة العابرة Transient period : في هذه الفترة تهبط قيمة التيار بمعدل أبطأ.
- فترة حالة الاستقرار Steady-state period : في هذه الفترة يصل التيار إلى قيمة ثابتة مستقرة.

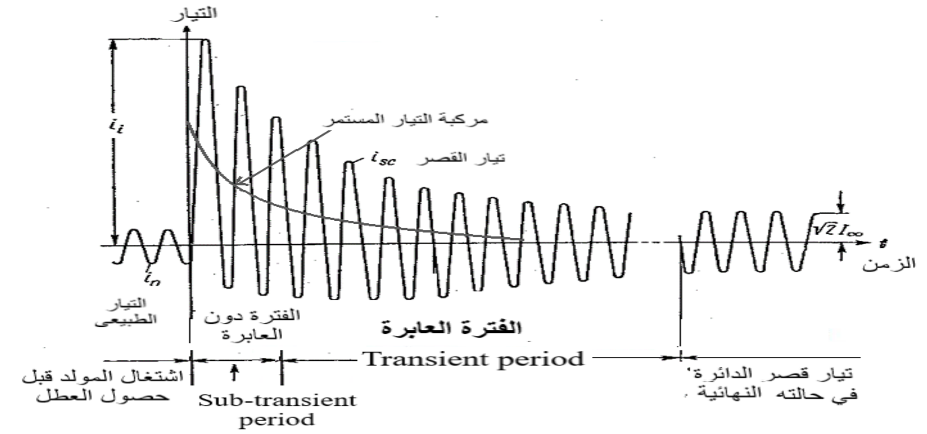
إن حقيقة هبوط قيمة مركبة التيار المتناوب لتيار العطل إلى أن تصل للحالة المستقرة كما موضحة في الشكل 5-2 تكمن في زيادة المفاعلة الحثية للماكنة التزامنية نفسها من قيمة صغيرة في البداية في لحظة حدوث العطل إلى أن تصل لقيمتها الأصلية في حالة استقرار وهي X_d أي المفاعلة التزامنية للمحور المباشر. والسبب في ذلك هو أنه في حالة الدائرة القصيرة تكون مفاعلة الدائرة أكبر بكثير من المقاومة بحيث يتأخر التيار في الساكن بزاوية 90 درجة تقريباً خلف الفولتية الدافعة وعليه تتمركز الـ ق .د.مغ لرد فعل المنتج المتكونة في حالة الاستقرار على المحور المباشر كلياً. وبالإسلوب نفسه فانه خلال الفترة التي تتغير فيها مفاعلة الماكنة التزامنية تؤخذ القيم على أساس الكميات في المحور المباشر في بعض الحالات.

التيار المتناوب الذي يتدفق في المولد خلال الفترة دون العابرة يسمى بالتيار دون العابر وتكون قيمته بحدود 10 أمثال تيار العطل في حالة الاستقرار .

التيار المتناوب الذي يجري في المولد خلال الفترة العابرة يسمى بالتيار العابر . هذا التيار تكون قيمته بحدود 5 أمثال تيار العطل في حالة الاستقرار . بعد الفترة العابرة يصل تيار العطل إلى حالة الاستقرار وتكون قيمته عبارة عن حاصل قسمة الفولتية المحتثة على المفاعلة التزامنية للمولد.



الشكل 5-1 المخطط الذبذبي للتيارات والفولتيات بعد حصول عطل قصر على أطراف مولد تزامني.



الشكل 5 -2 مراحل تغير التيار في الطور a أثناء حصول عطل قصر دائرة على المولد التزامني.

5-2 تحليل تيار العطل

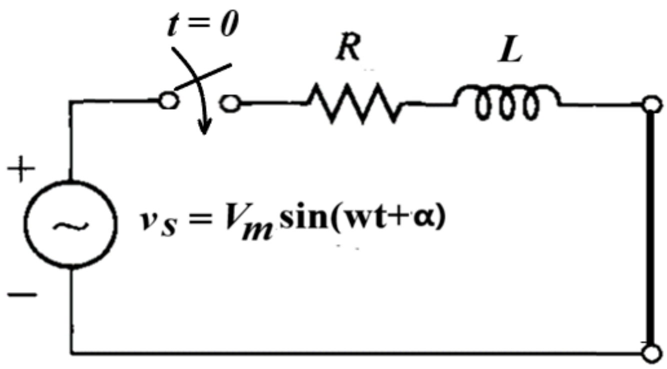
بالتمعن في تكوين تيار العطل في الشكل 5-2 نجد أنه يحتوي على:

- مركبة للتيار المستمر d.c. تتضائل بصورة أسية Exponentially تقريباً.
- مركبة متناوبة a.c. تتضائل مع الزمن وتصل إلى حالة الاستقرار.

إن مركبة التيار المستمر تنشأ من حقيقة أنه إذا تم تسليط مصدر للفولتية المتناوبة بصيغة

$$v_s(\omega t) = V_m \sin(\omega t + \alpha)$$

على دائرة كهربائية بسيطة تحتوي على مقاومة أومية R ومحاثة L بالهنري مربوطتين على التوالي كالتي في الشكل 5-3 ، فالتيار المار هو عبارة عن مجموع مركبة متناوبة لحالة الاستقرار ومركبة عابرة ذات



الشكل 5-3 دائرة مقاومة ومحاثة مربوطتان على التوالي.

إتجاه واحد تتلاشى أسياً بثابت زمن $\tau = L/R$ (مقدراً بالثواني) وقد تكون قيمة هذه المركبة صفراً اعتماداً على لحظة معينة على موجة الفولتية عند إيصال الدائرة . أما التيار فيمكن إيجاد معادلته الرياضية كالآتي:

في الحالة العابرة تتمثل الدائرة المبينة في الشكل 5 -3 بالمعادلة التفاضلية الآتية

$$L\frac{di}{dt} + i\,R = v_s(\omega t) = V_m \sin\,(\omega t + \alpha) \qquad (5.1)$$

هذه المعادلة التفاضلية من الدرجة الأولى حلها يتكون من قسمين:

1. حل حالة الاستقرار $i_{ss}(\omega t) = \frac{V_m}{Z}\sin(\omega t + \alpha - \theta)$

2. حل الحالة العابرة $i_{tr}(\omega t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}}$

حيث:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$\tan\theta = \frac{\omega L}{R}\ , \qquad \tau = \frac{L}{R}\ ,$$

$A =$ ثابت

اما الحل الكامل للمعادلة فيكون مجموع التيارين :

$$i(\omega t) = \ i_{ss}(\omega t) + i_{tr}(\omega t)$$

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{|Z|}\sin(\omega t + \alpha - \theta) + Ae^{-\frac{t}{\tau}} \qquad (5.2)$$

ولغرض إيجاد قيمة الثابت A نعوض في الظروف الإبتدائية $i(\omega t) = 0$, $t = 0$:

$$0 = \frac{V_m}{|Z|}\sin(-\theta + \alpha) + Ae^{-0}$$

$$\therefore\ A = \frac{V_m}{|Z|}\sin(\theta - \alpha)$$

وبتعويض قيمة A هذه في المعادلة (5.2) ينتج

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{|Z|}\sin(\omega t + \alpha - \theta)\ + \frac{V_m}{|Z|}\sin(\theta - \alpha)\, e^{-\frac{t}{\tau}}$$

وتكون معادلة التيار النهائية:

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}[\sin(\omega t + \alpha - \theta) + \sin\,(\theta - \alpha)e^{-cot\theta\ .\omega t}] \quad (5.3)$$

في هذه المعادلة يمثل الحد الأول فيها مركبة التيار المتناوب لحالة الاستقرار والحد الثاني يمثل مركبة التيار المستمر التي تنشأ في الحالة العابرة .

5-3 ثوابت (معالم) الماكنة التزامنية خلال العطل

بعد حدوث عطل قصر الدائرة على المولد التزامني سوف تحتث تيارات مختلفة في دوار الماكنة. بعض هذه التيارات تضمحل بصورة سريعة عن غيرها، في هذه الحالة فإن ثوابت الماكنة (المفاعلات والممانعات) التي تتأثر بالمركبات التي تتضائل بسرعة تسمى بالثوابت أو المعالم دون العابرة Sub transient parameters ، أما تلك التي تتأثر بالمركبات التي تتضائل بصورة بطيئة فتسمى بالثوابت أو

المعالم العابرة Transient parameters. وتلك الثوابت التي تتأثر بالمركبات المستديمة فتسمى بالثوابت أو المعالم التزامنية Synchronous parameters . وسنأتي على شرح هذه الحقائق والمصطلحات كما يأتي:

5-3-1 ثوابت الحالة دون العابرة

لمناقشة الأسباب التي تؤدي إلى التغير بالثوابت (خاصة المفاعلات والممانعات) فانه في اللحظة التي تسبق وقوع عطل قصر الدائرة يكون هناك فيض مغناطيسي قليل باتجاه المحور المباشر يترابط مع الساكن والدوار كليهما. هذا الفيض الذي يكون منشؤه القوة الدافعة المغناطيسية في الدوار عندما تكون الماكنة التزامنية غير محملة ومفتوحة الدائرة أو يكون متسبب عن محصلة الـ ق.د.مغ للدوار والساكن عندما يمر تيار ولو صغير في الساكن كما تم بيانه في الشكل 3-12 في الفصل الثالث. فاذا تعرض التيار في الساكن إلى تغير مفاجيء في الحمل أو إلى زيادة كبيرة مفاجئة عند حصول عطل قصر الدائرة ، فان الفيض الذي يترابط مع الساكن والدوار كليهما لا يمكن أن تتغير قيمته لحظياً ، ذلك بسبب وجود التيارات الدوامية Eddy currents الجارية في الدوائر المختلفة في حديد الدوار نفسه التي تعارض هذا التغيير المفاجئ . والسبب الآخر هو أن الـ ق.د.مغ للساكن تكون ضعيفة وغير قادرة على إنشاء أي رد فعل للمنتج في البداية ، ذلك لأن الجزء من المفاعلة التزامنية X_s المناظر لهذا الفعل لا يكون موجوداً ، لكن المفاعلة الحقيقية الموجودة في اللحظات الأولى لحدوث عطل القصر هي المفاعلة دون العابرة X_d'' (تكون عادة مساوية تقريباً في القيمة للمفاعلة التسربية X_l . والحالة دون العابرة التي تحدث للماكنة تكون كما قلنا نتيجة للتيارات المحتثة في سطح حديد الدوار والتي تضمحل بسرعة كبيرة (على افتراض أنه لاتوجد ملفات إخماد) لأنه إذا احتوت الماكنة على ملفات إخماد فان المركبة دون العابرة لتيار قصر الدائرة تمحى كلياً وسيتلاشى التيارالناتج عنها بصورة أسية وبثابت زمن T_d'' . وتجدر الإشارة إلى أن فترة الحالة دون العابرة ليست ذات فائدة في دراسات الاستقرارية لكونها فترة قصيرة جداً حيث يتراوح ثابت الزمن T_d'' الخاص بها بين دورة واحدة إلى دورتين بصورة عامة. لكن قيمة المفاعلة دون العابرة X_d'' تدخل في الحسابات إذا كان من الضروري معرفة قيمة التيار الإبتدائي لغرض حساب التيار المار في قاطع الدائرة عندما يغلق في حالة وجود قصر دائرة .

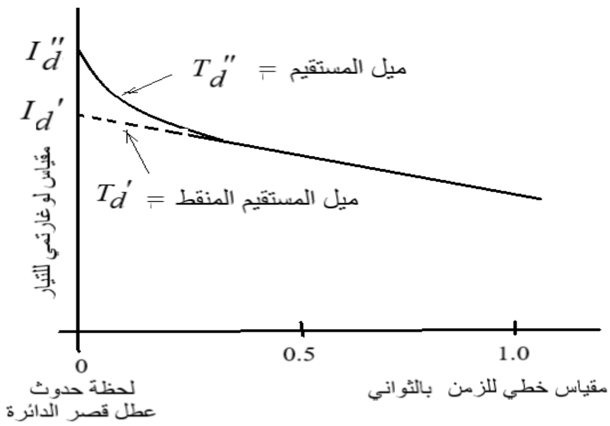
5-3-2 ثوابت الحالة العابرة وحالة الإستقرار

أما الحالة العابرة فتحدث نتيجة للتيارات المحتثة في ملف المجال . هذه التيارات المحتثة تؤخرتأثير رد فعل المنتج أيضاً حسب النظرية القائلة بأن ترابط الفيض لدائرتين متقاربتين متبادلتين لايمكن أن يتغيربصورة لحظية. أما القوى الدافعة الكهربائية دون العابرة والعابرة والمتزامنة التي تتولد خلف المفاعلات المناظرة لها فتكون E'' و E' و E . إن الدائرة المكافئة للماكنة التزامنية في الحالة

العابرة سوف تحتوي على فولتية دافعة ثابتة متولدة داخل ملفات المولد سوية مع مفاعلة تكون متغيرة في القيمة. والجزء X_l من X_s أو X_d هو فقط مفاعلة حقيقية بينما تمثل الأجزاء الباقية التغير الحاصل في محصلة القوة الدافعة المغناطيسية والقوة الدافعة الكهربائية المتولدة نتيجة لرد فعل الساكن . في الحقيقة فإن تيار القصر عند عامل قدرة منخفض جداً يقلل من القوة الدافعة الكهربائية المحتثة في الماكنة أكثر فأكثر كلما ازداد رد فعل المنتج.

إذا كانت قيمة ج.م.ت للقوة الدافعة الكهربائية / للطور في حالة الدائرة المفتوحة هي E وكان بالإمكان إهمال قيمة مقاومة ملفات الساكن عندئذ تكون قيمة ج.م.ت التيار في الحالة المستقرة هي $I = E / X_d$ بحيث يمكن إيجاد قيمة X_d من ذلك الجزء من الرسم الذبذبي الموضح في الشكل 5-2 الذي يصبح غلاف التيار عنده ثابتاً لا يتغير. وفي القسم الأول من الرسم الذبذبي يمكن إيجاد قيمة ج.م.ت التيار المتناوب بقسمة قيمة الذروة – إلى – الذروة لهذا التيار على $2\sqrt{2}$ ، وإذا ما تم رسم التيار الناتج ناقصاً قيمة التيار المتناوب في الحالة المستقرة I بمقياس لوغارتمي كما مبين في الشكل 5-4 في المحور الصادي (العمودي) ومقياس خطي للزمن على المحور السيني (الأفقي) فسيكون الرسم خطياً بصرف النظر عن الدورات الأولى القليلة للفترة دون العابرة . إن ميل هذا الجزء من المنحني يعطي ثابت الزمن العابر T_d' وإذا سحب هذا الخط المستقيم إلى الوراء ليقطع المحور الصادي فسوف يعطي قيمة التيار العابر I_d' الذي يساوي E/X'_d ؛ عليه سنقوم بتعريف X_d' بكونها المفاعلة العابرة للمحور المباشر .

وإذا تم رسم قيمة ج.م.ت للتيار خلال الدورات الأولى فوق القيم المرسومة على شكل خط مستقيم منقط في الشكل 5-4 بمقياس لوغارتمي للتيار مع مقياس خطي للزمن فسيعطي ذلك خطاً مستقيماً ميله هو عبارة عن ثابت الزمن دون العابر T_d'' ؛ وهذا المنحني الجديد سيقطع المحور الصادي بتيار قيمته ، حيث X_d'' تسمى المفاعلة دون العابرة للمحور المباشر. والممانعات التي تبديها الماكنة التزامنية وأزمان ظهورها في الحالات الثلاثة : دون العابرة والعابرة وفترة الاستقرار موضحة في الشكل 5-5 .



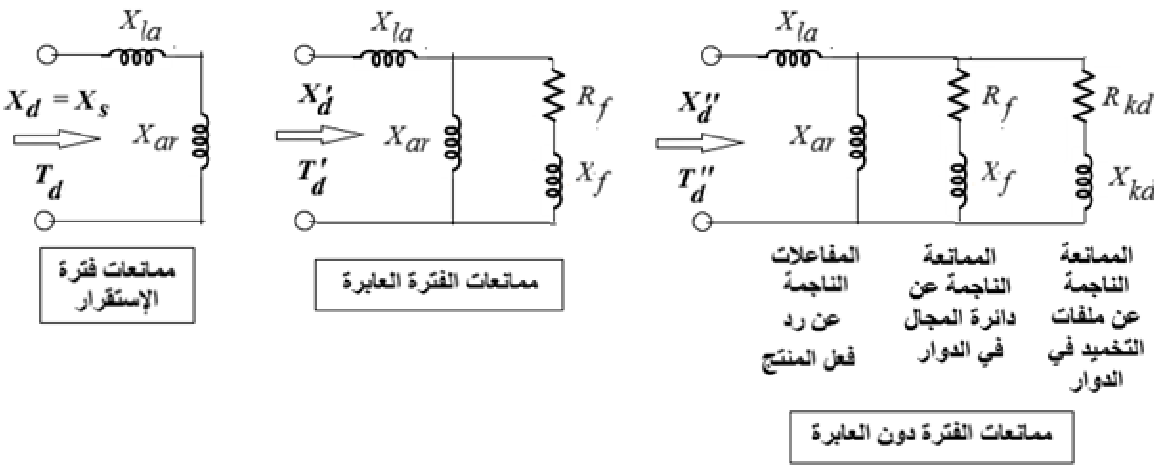
الشكل 5-4 المركبات العابرة ودون العابرة لتيار الدائرة القصيرة .

على هذا الأساس فانه إذا حدث عطل قصر دائرة مفاجئ على أطراف مولد تزامني فسوف تنتج ثلاث دوائركهربائية على ثلاث فترات زمنية كل دائرة لها ثابت زمن وكالاتي:

T_d'' = ثابت الزمن دون العابر للمحور المباشر خلال قصر الدائرة = 35 ملي ثانية تقريباً.

T_d' = ثابت الزمن العابر للمحور المباشر خلال قصر الدائرة = 1 إلى 2 ثانية تقريباً.

T_d = ثابت الزمن حالة الاستقرار للمحور المباشر خلال قصر الدائرة = مالانهاية.



(جـ) (ب) (أ)

الشكل 5-5 الممانعات التي تبديها الماكنة التزامنية وأزمان ظهورها في الحالات الثلاثة : دون العابرة والعابرة وفترة الاستقرار.

كذلك سوف تنشأ ثلاثة تيارات كما يأتي :

I_d'' = التيار دون العابر للمحور المباشر خلال قصر الدائرة

I_d' = التيار العابر للمحور المباشر خلال قصر الدائرة

I_d = تيار حالة الاستقرار للمحور المباشر خلال قصر الدائرة

وبصورة مماثلة للدائرة الحاوية على مقاومة ومفاعلة ؛ إذا حدث عطل قصر دائرة ثلاثي الطور على أطراف مولد تزامني غير محمل له ج.م.ت فولتية طور تساوي $V_m/\sqrt{2}$ فسيجري تيارقصر يحتوي على مركبتين :

$$i_{sc} = i_{ac}(t) + I_{dc}$$

حيث

- $i_{ac}(t)$ مركبة التيار المتناوب

$$i_{ac}(t) = V_m \left\{ \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-t/T_d''} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/T_d'} + \frac{1}{X_d} \right\} \sin(\omega t + \delta) \qquad (5.4)$$

- I_{dc} مركبة التيار المستمر

هنا عند اللحظة التي تكون فيها مركبة التيار المستمر في أحد الأطوار بأقصى قيمتها فسيحمل ذلك الطور مركبة تيار مستمر كما يأتي

$$I_{dc} = \frac{V_m}{X_d''} \sin \delta \ e^{-t/T_d}$$

والمفاعلة المستخدمة هنا لايجاد ثابت الزمن T_d بالنسبة لمركبة التيار المستمر لتيار الساكن فتؤخذ بالتقريب مساوية إلى ممانعة التتابع السالب X_2 لطور الساكن ذلك لأن أغلب التضاؤل الذي يحصل لهذه المركبة يكون خلال الفترة دون العابرة . أما قيمة X_2 فتساوي بالتقريب إلى متوسط قيمتي X_d'' و X_q'' حيث X_q'' هي المفاعلة دون العابرة للمحور العمودي. وثابت الزمن T_d في هذه الحالة يساوي بالتقريب $X_2/2\pi fR$ = (0.1 ثانية) و R هي مقاومة الساكن لكل طور.

5-4 أسوأ حالات العطل على المولد التزامني

إن أسوأ حالة عطل على المولد التزامني هي الحالة التي تكون فيها مركبة التيار المستمر في أعلى قيمتها وذلك عندما تكون الزاوية δ تساوي 90 درجة حيث تكون قيمة هذه المركبة

$$I_{dc} = \frac{V_m}{X_d''} \ e^{-t/T_d} \qquad (5.5)$$

عليه يمكن كتابة المعادلة الكلية لتيار قصر الدائرة كالآتي:

$$i_{sc}(t) = V_m\left\{\left(\frac{1}{X_d''}-\frac{1}{X_d'}\right)e^{-t/T_d''}+\left(\frac{1}{X_d'}-\frac{1}{X_d}\right)e^{-t/T_d'}+\frac{1}{X_d}\right\}\sin(\omega t+\delta)$$
$$+\frac{V_m}{X_d''}\sin\delta\ e^{-t/T_d} \qquad (5.6)$$

أما قيمة ج.م.ت لمركبة التيار المتناوب فتكون

$$I_{ac} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}\left\{\left(\frac{1}{X_d''}-\frac{1}{X_d'}\right)e^{-t/T_d''}+\left(\frac{1}{X_d'}-\frac{1}{X_d}\right)e^{-t/T_d'}\right.$$
$$\left.+\frac{1}{X_d}\right\}\sin(\omega t+\delta) \qquad (5.7)$$

كذلك يمكن حساب أقصى قيمة لتيار قصر الدائرة (ac+dc) الذي يطلق عليه التيار اللامتماثل

$$I_{asy} = \sqrt{I_d^2 + I_{dc}^2}$$

أو قد يكتب كما يأتي:

$$I_{asy} = \sqrt{\left(\frac{V_m}{X_d''\sqrt{2}}\right)^2+\left(\frac{V_m}{X_d''}\right)^2} = \sqrt{\frac{3}{2}}\times\frac{V_m}{X_d''} = \sqrt{3}I_d''$$

وتجدر الإشارة إلى أن حساب قيمة التيار اللامتماثل ضروري جداً لتحديد سعة قاطع الدائرة الوقتي

.Momentary duty of the C.B

ويبين الجدول 5-1 قيم نموذجية لثوابت (معالم) الماكنة التزامنية الحرارية والهيدروليكية (المائية).

الجدول 5-1 .

ثابت الماكنة (المعلم)	Parameter	وحدة توليد حرارية	وحدة توليد مائية
المفاعلة التزامنية	X_d	1.0 - 2.3	0.6 - 1.5
	X_q	1.0 - 2.3	0.4 - 1.0
المفاعلة العابرة	X'_d	0.15 - 0.4	0.2 - 0.5
	X'_q	0.3 - 1.0	-
المفاعلة دون العابرة	X''_d	0.12 - 0.25	0.15 - 0.35
	X''_q	0.12 - 0.25	0.2 - 0.45
ثابت زمن الحالة العابرة	T'_d	3.0 - 10.0 s	1.5 - 9.0 s
	T'_q	0.5 - 2.0 s	-
ثابت زمن الحالة دون العابرة	T''_d	0.02 - 0.05 s	0.01 - 0.05 s
	T''_q	0.02 - 0.05 s	0.01 - 0.09 s
المفاعلة التسربية لملف الساكن	X_l	0.1 - 0.2	0.1 - 0.2
مقاومة ملف الساكن	R_a	0.0015 - 0.005	0.002 - 0.02

مثال 5-1 :

مولد تزامني ثلاثي الطور قدرته 100 MVA، 60 هرتز ، مربوط داخلياً بشكل نجمي Y يولد فولتية مقننة 13.8 kV. ربط هذا المولد إلى محول قدرة MVA100 ذي فولتية kV/220kV13.8 مثلثي – نجمي (Δ – Y) الربط.

مفاعلات المولد بنسبة الوحدة محسوبة على قيم الأساس للمولد نفسه :

X''_d =0.12 p.u , X'_d = 0.25 p.u. , X_d = 1.0 p.u.

والأزمان الثابتة :

T''_d = 0.4 s , T'_d = 1.1 s , T_d = 0.25 s

مفاعلة المحول هي 0.20 بنسبة الوحدة على الأساس نفسه للمولد.

عند تشغيل المولد بفولتيته المقننة وبدون حمل حدث عطل قصر دائرة ثلاثي الطور على أطراف ثانوي المحول :

(أ) جد تيارات قصر الدائرة لحالات دون العابرة والعابرة وحالة الاستقرار بنسبة الوحدة وكذلك جد هذه التيارات الحقيقية على جهتي المحول.

(ب) جد قيمة ج.م.ت للتيار اللامتماثل عند لحظة العطل .

(جـ) جد تيار قصر الدائرة الكلي اللحظي بدلالة I_d'' و I_d' و I_d إذا كانت الزاوية $\delta = 90^o$.

الحل:

(أ) نجد أولاً التيار الأساس للمولد : نختار قدرة وفولتية المولد كأساسين

القدرة الأساس $S_b = 100\ MVA$ ، والفولتية الأساس $V_b = 13.8$ kV

$$S_b = \sqrt{3} V_b I_b = 100\ MVA$$

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} V_b} = \frac{100 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 10^3} = 4184\ A$$

التيار الأساس على جهة الثانوي للمحول

$$I_{b2} = \frac{V_p}{V_s} I_{b1} = \frac{13.8}{220} \times 4184 = 262.4\ A$$

تيارات قصر الدائرة للحالات دون العابرة والعابرة وحالة الاستقرار تحسب كالآتي:

$$I_d'' = \frac{1.0}{0.12 + 0.20} = 3.125\ p.u.$$

على جهة المولد :

$$I_d'' = 3.125\ \times 4184 = 13075\ A$$

على جهة ثانوي المحول

$$I_d'' = 3.125\ \times 262.4 = 820\ A$$

بالأسلوب نفسه على جهة المولد :

$$I'_d = \frac{1.0}{0.25 + 0.20} = 2.22\ p.u. = 9288.5\ A$$

على جهة ثانوي المحول

$$I'_d = 2.22\ \times 262.4 = 582.5\ A$$

بالأسلوب نفسه على جهة المولد :

$$I_d = \frac{1.0}{1.0 + 0.20} = 0.833\ p.u. = 3486\ A$$

على جهة ثانوي المحول

$$I_d = \ 0.833 \times 262.4 = 218.6\ A$$

(ب) التيار اللامتماثل في بداية نشوء العطل

على جهة المولد $I_{asy} = \sqrt{3}\, I''_d = \sqrt{3}\ \times 3.125 = 5.4\ p.u. = 22640\ A$

(جـ) تيار قصر الدائرة بدلالة التيارات الثلاثة :

$$i_{sc}(t) = \left\{\left(\frac{V_m}{X''_d} - \frac{1}{X'_d}\right) e^{-t/T''_d} + \left(\frac{V_m}{X'_d} - \frac{V_m}{X_d}\right) e^{-t/T'_d} + \frac{V_m}{X_d}\right\} \sin(\omega t + \delta) + \frac{V_m}{X''_d} \sin\delta\ \ e^{-t/T_d}$$

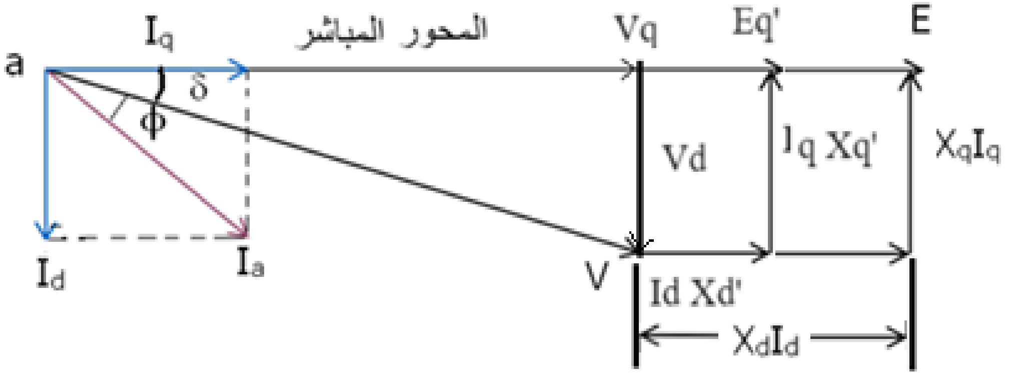
$$i_{sc}(t) = \sqrt{2}\left\{\left(\frac{V}{X''_d} - \frac{V}{X'_d}\right) e^{-t/T''_d} + \left(\frac{\mathrm{V}}{X'_d} - \frac{\mathrm{V}}{X_d}\right) e^{-t/T'_d} + \frac{\mathrm{V}}{X_d}\right\} \sin(\omega t + 90) + \frac{\sqrt{2}V}{X''_d}\ \sin 90\ \ e^{-t/T_d}$$

$$i_{sc}(t) = \sqrt{2}\left\{(I''_d - I'_d) e^{-t/0.4} + (I'_d - I_d) e^{-t/1.1} + I_d\right\} \sin(\omega t + 90)\, I''_d \sin 90\ \ e^{-t/0.25}$$

$$i_{sc}(t) = \left\{1.28\ e^{-t/0.4} + 1.9\ e^{-t/1.1} + 1.18\right\} \sin(377t + 90) + 4.42\ e^{-t/0.25}\ \ \ p.u.$$

5-5 تحليلات الحالة العابرة لمولد ذي قطب بارز

بالنسبة لتحليلات الحالة العابرة لمولد تزامني ذي قطب بارز (محمل بحمل كهربائي وله مقاومة ملف الساكن صغيرة جداً بحيث يمكن أن تهمل) خلال فترة قصيرة من الزمن التي هي أقل من $T_d^{`}$ والتي تلي حدوث تغير في ظروف الأشتغال ، هذه التحليلات تكون أقل تعقيداً إذا تم تنفيذها بدلالة مركبتي التيار على المحور المباشر والمحور التعامدي (الخيالية) بدلاً من تنفيذها بدلالة تيارات الساكن الفعلية في الأطوار الثلاثة . في هذه الحالة يجب أن تكون جميع الكميات بصيغة نسبة الوحدة وكل كميات الساكن تكون على أساس تقنين المولد نفسه . والكميات الأساس للملفات الأخرى (ملفات محاور d و q لملفات المجال و ملفات الأخماد) تقررهذه بعد ذلك حسب نظرية المحول. والعلامة المقترحة الآن للمفاعلة بنسبة الوحدة هي الحرف الصغير x بينما الحرف الكبير X يشير الى المفاعلة بالأوم. وقيم i_d و i_q بنسبة الوحدة تكون مساوية للقيم بنسبة الوحدة لـ I_d و I_q والتي هي مركبات طورية لتيار الساكن I كما مبين في الشكل 5-6. واذا كانت التيارات مقدرة بالأمبير فان قيمة التيارين $i_d = \sqrt{2I_d}$ و $i_q = \sqrt{2I_q}$.



الشكل 5-6 المخطط الطوري للماكنة التزامنية ذات الأقطاب البارزة بدلالة المحورين المباشر والعمودي.

إن نظرية الحالة العابرة. للمولد التزامني تفترض نظرية ترابط الفيض الثابت ، أي أنه نتيجة للمحاثة فان ترابط الفيض يبقى ثابتاً لزمن قصير بعد أن يطرأ أي تغير مفاجيء في ظروف التشغيل. لذا فمن الشكل 5-6 يمكننا أن نكتب المعادلة التالية

$$E_q^{`} = V_q + I_d X_d^{`} = V cos\delta + I_d X_d^{`} \qquad (5.8)$$

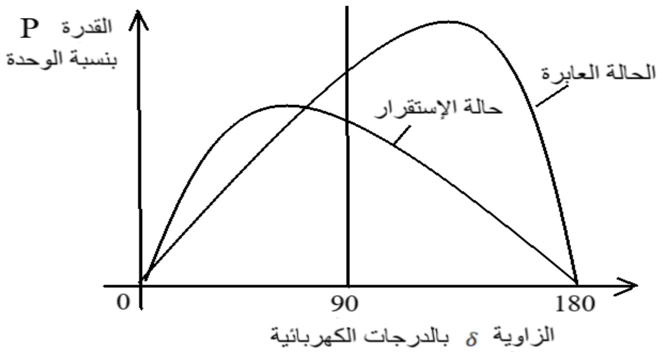
ويمكن ان نثبت ان $E_q^`$ تتناسب مع ترابط فيض المجال الكلي وبذلك يمكن أن نفترضه يبقى ثابتاً على مدى الفترة العابرة (كتاب Fitzgerald and Kingsley). عليه فان القدرة الخارجة من مولد محمل خلال الفترة العابرة يمكن أن تعطى بالمعادلة

$$P = VI\ cos\emptyset = V_d I_d + V_q I_q \qquad (5.9)$$

وبالتعويض من المعادلة (5.8) وباستعمال $V_d = Vcos\ \delta = I_q X_q$ نحصل على

$$P = \frac{E_q^` V\ sin\delta}{X_d^`} - \frac{X^2}{2}\left(\frac{1}{X_d^`} - \frac{1}{X_q}\right)\sin 2\delta \qquad (5.10)$$

هذه المعادلة مشابهة للمعادلة (5.9) (التي تعطينا القدرة الخارجة للحالة المستقرة) ولكن تم ابدال E بـ $E_q^`$ مع ابدال $X_d^`$ بـ X_d . وبما أن E_q'/X_d' أكبر من E/X_d فان القدرة القصوى تكون أكبر خلال الظرف العابرمنها خلال حالة الإستقرار. لاحظ كذلك أن الحد الثانى قد عكست إشارته لان $X_d <$ $X_q > X_d^`$ بصورة عامة . إذا افترضنا انه لايوجد ملف مجال على المحور المتعامد فعندئذ تكون $X_q^` = X_q$ ، وهذا ليس صحيحا إذا استعملنا دواراً ذا ملف مجزء. الشكل 5-7يبين منحنيات القدرة / الزاوية للحالتين المستقرة والعابرة لمولد ذي قطب بارز محمل . أما عند ربط المولد إلى قضيب توزيع لانهائي فان اضافة مفاعلة المغذي الرابط الثابتة إلى مفاعلات المولد المختلفة سيمحي الاختلاف بين منحنيي القدرة / الزاوية .



الشكل5-7 منحنيات القدرة / الزاوية للحالتين المستقرة والعابرة لمولد ذي قطب بارز.

إن التقريب الاول في تحليلات الاستقرارية العابرة للماكنة ذات الأقطاب البارزة هو أن يهمل تاثير القطب البارز في الحالة العابرة عادة عن طريق حذف الحد الثاني في المعادلة (5.10) وبذلك يصبح منحني القدرة / الزاوية جيبياً . وهذا التقريب يكون مبرراً أكثر عند التأمل في القدرة القصوى

منه لقيم صغيرة للزاوية δ حيث أن الحد الثاني قد يكون في الحقيقة ذا رتبة مساوية للحد الاول ، ولتبسيط أكثر يمكننا أن نستعمل $E^{`}$ بوصفها ق . د . ك خلف المفاعلة العابرة $X_d^{`}$ بدلا من $E_q^{`}$. وتعرف المواصفات القياسية الدولية والبريطانية كل معالم الماكنة الضرورية لتحليلات الماكنة المتزامنة وتعطي كذ لك طرق الفحص المستعملة لتحديد هذه القيم ومنها فحص الدائرة المفتوحة Open circuit test وفحص الدائرة القصيرة Short circuit test. وينصح القارئ بمراجعة كتب المكائن الكهربائية المنهجية والمرجعية لهذا الغرض.

الفصل 6 إستقرارية الحالة المستقرة Steady-State Stability

6-1 مقدمة

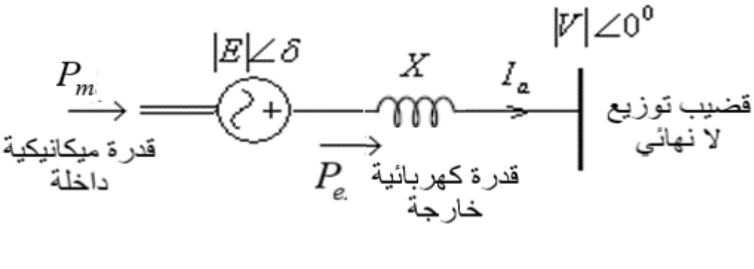
سبق وأن تم تعريف استقرارية الحالة المستقرة (الثابتة) بأنها قابلية المنظومة الكهربائية على العودة إلى حالة الاستقرار بعد تعرضها إلى اضطرابات صغيرة. هذه الاضطرابات الصغيرة تنتج عن تغير صغير في الأحمال أو تغير صغير في القدرة الداخلة إلى المولد التزامني .

ولغرض دراسة مسائل استقرية الحالة المستقرة يجب عمل الفرضيات الآتية:

- الإضطرابات التي تحدث التغيرات تختفي في وقت قصير، وتترك المنظومة في حالة حركة حرة.
- جميع المعادلات التي تحكم تصرف المنظومة تكون خطية .
- أجهزة السيطرة التلقائية مثل جهاز التحكم بالفولتية وجهاز التحكم بسرعة الماكنة يفترض أنها تكون غير عاملة خلال فترة الإضطراب.

6-2 إستقرارية الحالة المستقرة لماكنة مفردة

تأمل الآن بماكنة تزامنية مفردة مربوطة إلى قضيب توزيع لانهائي كما في الشكل 6-1.



الشكل 6-1 ماكنة تزامنية مفردة مربوطة إلى قضيب توزيع لانهائي.

في هذا الشكل

$|E|\angle\delta$: الفولتية خلف المفاعلة التزامنية العابرة للماكنة .

$|V|\angle 0^0$: فولتية قضيب التوزيع اللانهائي .

X : المفاعلة التزامنية أو المفاعلة العابرة للماكنة .

كما تم توضيحه في الفصل الخامس فان ديناميكية حركة الماكنة تحكمها المعادلة :

$$M.\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \qquad (6.1)$$

حيث

$$P_e = \frac{|E|.|V|}{X} \sin\delta = P_{max}.\sin\delta \qquad (6.2)$$

في هذه المعادلة

$$P_{max} = \frac{|E|.|V|}{X} \qquad (6.3)$$

وهي القدرة العظمى المنتقلة من الماكنة.

واذا كانت الزاوية δ هي المتغير المستقل الوحيد في المعادلة (6.2) فان القدرة الخارجة P_e ستكون صفراً عندما $\delta = 0$ وتأخذ قيمتها العظمى عندما $\delta = 90°$. إن القدرة القصوى هي P_{max} وهي حد الاستقرارية للحالة المستقرة.

بما أن δ هي الزاوية بين موقع قطب الدوار في حالة الحمل وموقعه في حالة اللاحمل فان δ تساوي صفراً عند مزامنة المولد بدايةً عند ربطه مع قضيب التوزيع اللانهائي . وعند زيادة تجهيز البخار إلى توربين المولد بحيث أن السرعة الكهربائية للمولد ω كانت أكبر من السرعة التزامنية ω_s بصورة مؤقتة فان الزاوية تكون

$$\delta = (\omega - \omega_s)t$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt}$$

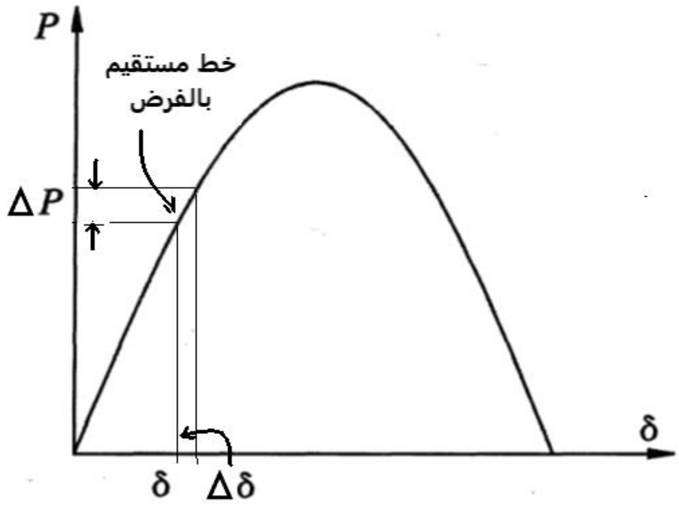
وهكذا فان التعجيل أو التسارع النسبي والتسارع المطلق يكونان متساويين ، والسرعة الزاوية في مضمار هذا الفصل ستعني السرعة نسبة إلى السرعة التزامنية لقضيب التوزيع اللانهائي .

الآن لنفرض أن المنظومة كانت تشتغل في حالتها المستقرة وتعطي قدرة منتقلة مقدارها P_{e0} بزاوية قدرة δ_0. وافرض أنه حدث تغيير جزئي في الحمل ΔP_e بينما بقيت القدرة الداخلة من المدور الأساسي (توربين المولد) P_m ثابتة. هذه الحالة تعد طبيعية لكون أن متحكم السرعة يعمل ببطأ مقارنة مع ديناميك التغير في الحمل الكهربائي.

إن التغير بالقدرة الكهربائية ΔP_e سيؤدي إلى تغيير في زاوية القدرة أو العزم $\Delta\delta$. عليه فانه للاضطراب الصغير يمكن أن نجعل معادلة التأرجح معادلة خطية بسيطة يسهل حلها وكما يأتي :

بما أن القدرة الكهربائية تكون دالة حقيقية لزاوية القدرة نفسها ، أي أن $P_e = f(\delta)$ ، فانه يمكن رياضياً جعل هذه الدالة خطاً مستقيماً حول النفقطة (P_{e0}, δ_0) ، أنظر الشكل 6-2 وذلك باسخدام مفكوك تايلور Taylor's expansion ، وباخذ حدين فقط من هذا المفكوك :

$$P_{e0} + \Delta P_e = P_{e0} + \left(\frac{\partial P_e}{\partial \delta}\right)_0 . \Delta\delta$$



الشكل 6-2 منحنى القدرة كدالة لزاوية الدوار .

من هذه المعادلة نجد

$$\Delta P_e = \left(\frac{\partial P_e}{\partial \delta}\right)_0 . \Delta\delta \qquad (6.4)$$

وبأخذ التغير في ΔP_e وكذلك في $\Delta\delta$ بعين الإعتبار فانه يمكن إعادة كتابة المعادلة(6.1) كما يأتي

$$M.\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} = P_m - (P_{e0} + \Delta P_e) \qquad (6.5)$$

لكن

$$P_{e0} = P_m \qquad (6.6)$$

من المعادلتين (6.5) و (6.6) نجد أن

$$M\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} = -\Delta P_e \qquad (6.7)$$

بتعويض (6.7) و (6.4) ينتج

$$M\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} = -\left(\frac{\partial P_e}{\partial \delta}\right)_0 . \Delta\delta \tag{6.8}$$

بإعادة ترتيب المعادلة (6.8) كالآتي

$$M\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + \left(\frac{\partial P_e}{\partial \delta}\right)_0 . \Delta\delta = 0 \tag{6.9}$$

هذه المعادلة هي معادلة خطية تفاضلية من الدرجة الثانية ذات معادلة مميزة characteristic equation

$$M.r^2 + \left(\frac{\partial P_e}{\partial \delta}\right)_0 = 0 \tag{6.10}$$

هذه المعادلة المميزة لها جذران

$$r^2 = \pm\sqrt{-\frac{1}{M}\left(\frac{\partial P_e}{\partial \delta}\right)_0} \tag{6.11}$$

إذا كان $\left(\frac{\partial P_e}{\partial \delta}\right)_0 < 0$ أي يكون سالب الإشارة ، فان أحد جذور المعادلة (6.11) يكون حقيقاً وموجباً وهذا يعني أن المنظومة غير مستقرة لكون أن زاوية العزم تزداد بدون قيد عند حدوث الإضطراب وبذلك تفقد المنظومة حالة التزامن (الإستقرار).

- إذا كان $\left(\frac{\partial P_e}{\partial \delta}\right)_0 > 0$ أي يكون موجب الإشارة ، فان جذور المعادلة (6.11) يكون خيالياً بحتاً ولهما زوجين اثنين من المترافقين Conjugate pair ، وتكون المنظومة في هذه الحالة متذبذبة حول النقطة (P_{e0}, δ_0) لكن مقاومة الخط ومقاومة ملفات التخميد للماكنة سيجعل هذا التذبذب يتضائل . هذا يعني أن المنظومة تكون مستقرة عندما يتحقق الشرط $\left(\frac{\partial P_e}{\partial \delta}\right)_0 > 0$.
- وتجدر الإشارة اليه أن الحد $P_s = \left(\frac{\partial P_e}{\partial \delta}\right)_0$ يطلق عليه اسم معامل التزامن لصلابة الماكنة التزامنية ، ولإيجاد قيمته الحقيقية نأخذ التفاضل للمعادلة (6.2) فنجد أن

$$\left(\frac{\partial P_e}{\partial \delta}\right)_0 = P_{max}.cos\,\delta_0 = P_s \tag{6.12}$$

أي أن

$$\therefore P_s = \left(\frac{\partial P_e}{\partial \delta}\right)_0 = \frac{|E|.|V|}{X}\cos\delta$$

من هذه المعادلة يمكن استنتاج الآتي

- أن الشرط الذي تكون فيها المنظومة مستقرة ، $\left(\frac{\partial P_e}{\partial \delta}\right)_0 > 0$ ، يجب تحقيق أن $cos\, \delta_0 > 0$ أي بعبارة أخرى $\delta_0 < 90^0$.
- يكون اشتغال المنظومة غير مستقرة ، $\left(\frac{\partial P_e}{\partial \delta}\right)_0 < 0$ للحالة عندما يكون $cos\, \delta_0 < 0$ أو بعبارة أخرى عندما تكون $\delta_0 > 90^0$.
- أعظم قدرة يمكن ان تنتقل بدون فقدان الإستقرارية تكون عندما $\delta_0 = 90^0$ ، في هذه الحالة تكون $P_{max} = \frac{|E|.|V|}{X}$.

الآن لوجعلنا التغير اللحظي الناتج عن تغير زاوية الحمل $(\Delta\delta)$. فالتغير في القدرة الكهربائية المنقولة على طول المغدي الرابط سيعطى بالمعاد لة التالية

$$\frac{dP_e}{d\delta}(\Delta\delta) = P_s(\Delta\delta) \qquad (6.13)$$

حيث ان P_s هو معامل القدرة التزامنية الذي نستطيع الحصول عليه من (6.12) أي

$$P_s = \frac{dP}{d\delta} = P_{max}\cos\delta$$

وهو في هذا النطاق يكون ثابتاً ومناظر لقيمته عندما تكون $\delta = \delta_o$, معادلة حركة الدوارستكون.

$$M\frac{d^2\delta}{dt^2} + P_s(\Delta\delta) = \Delta P \qquad (6.14)$$

والحل العابر يمكن ان نحصل عليه باستخدام طريقة لابلاس بفرض $\Delta P = 0$:

$$\Delta\delta(MS^2 + P_s) = 0$$

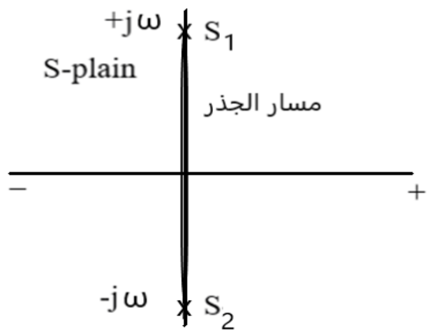
$$(S^2 + \frac{1}{M}P_s) = 0$$

حل هذه المعادلة سيعطي جذرين : $S_2 = -\sqrt{\frac{-P_s}{M}}$, $S_1 = +\sqrt{\frac{-P_s}{M}}$ بما أن معامل الصلابة P_s هو عبارة عن ميل المنحنى الذي يمثل العلاقة بين القدرة وزاوية الدوار فانه إما أن يكون موجباً أو سالباً ؛ لذلك فإن تقييم استقرارية المنظومة يكون على أساس ميل المستقيم وكالآتي لأحدى الحالت

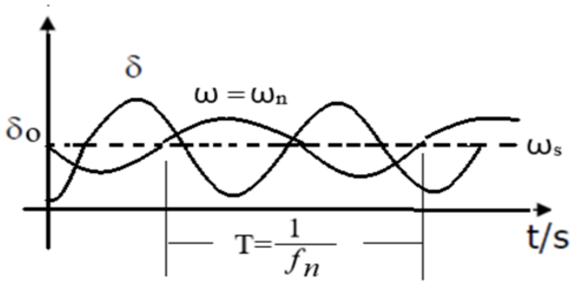
الحالة رقم-1:عندما يكون Ps موجباً ، فكلا الجذران S_1 و S_2 سيقعان على المحورالتخيلي (axis-jω) كما في الشكل 6- 3 وتكون حركة الدوار تذبذبية بذبذبة طبيعية مستديمة غير مضمحلة تكون قيمتها (بإهمال كافة المفاقيد):

$$\omega_n = \sqrt{\frac{P_s}{M}} = \sqrt{\pi f_n \frac{P_s}{H}} \qquad rad/s$$

حيث أن ω_n هى التردد الطبيعي غيرالمخمد للتذبذب بالزوايا النصف قطرية / ثانية أو هيرتز و فترة التذبذب تكون بالدورة لكل ثانية .



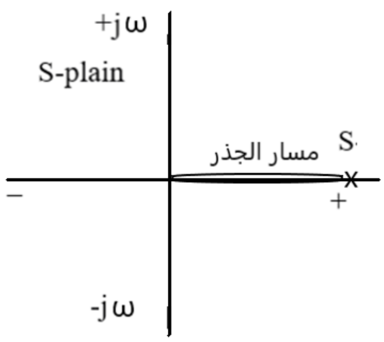
(أ)



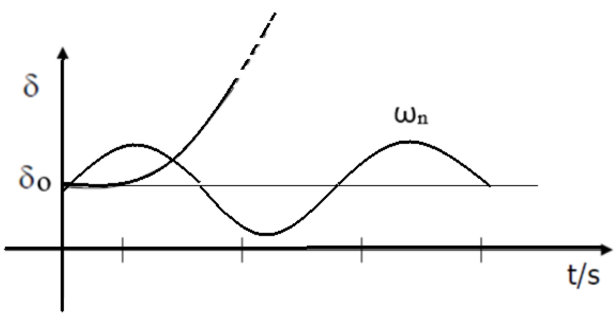
(ب)

الشكل 6-3 الحالة رقم -1 :(أ) مسار الجذور في حيز التردد ، (ب) الاستجابة في حيز الزمن.

الحالة رقم – 2 :عندما يصبح الميل سالباً ، فانه سيكون هناك جذر واحد للمعادلة يقع على جهة اليمين للمستوي (S (S-plain ويكون التغير في قيمة الزاوية متصاعداً بصورة أسية وتصبح المنظومة غير مستقرة تماماً وتفقد حالة التزامن في النهاية. كما في الشكل 6-4 (ب).



(أ)

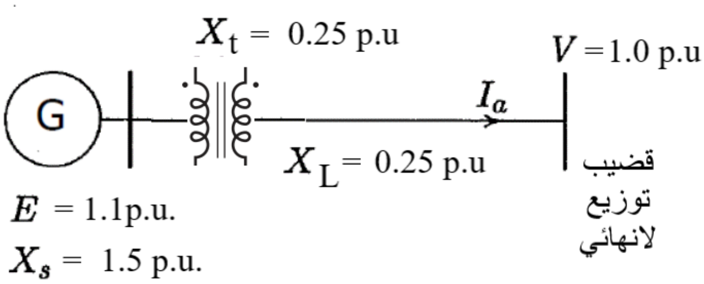


(ب)

الشكل 6-4 الحالة رقم -2 : (أ) مسار الجذور في حيز التردد ، (ب) الاستجابة في حيز الزمن.

مثال 6-1 :

مولد تزامني مفاعلته بنسبة الوحدة تساوي 1.5، يولد فولتية بتردد 50 هرتز. ربط هذا المولد إلى قضيب توزيع لانهائي فولتيته 1.0 بنسبة الوحدة عن طريق خط نقل ومحول مجموع مفاعلتيهما (0.5) بنسبة الوحدة كما مبين في الشكل 6-5. فو لتية اللاحمل للمولد 1.1 بنسبة الوحدة وثابت عزم القصور الذاتي له . جميع قيم المعطات بنسبة الوحدة تم حسابها على الأساس نفسه باهمال تأثير المقاومات وملفات الإخماد. احسب تردد التذبذب الناجم عن اشتغال المولد بزاوية قدرة 60 درجة عند تعرضه لاضطراب صغير.



الشكل 6-5

الحل:

نحسب في البداية معامل التزامن P_s :

$$P_s = \frac{dP}{dt}\bigg|_{\delta=\delta_o} = \frac{|E|.|V|}{X} cos\,\delta = \frac{1.1 \times 1.0}{1.5 + 0.25 + 0.25} \cos 60$$

$$\therefore P_s = 0.272\, p.u.$$

جذرا المعادلة *S1* و *S2* :

$$S_1 \;\&\; S_2 = \pm\sqrt{\frac{-P_s}{M}} = \pm\left(\frac{-\pi f_s P_s}{H}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$S_1 \;\&\; S_2 = \pm\left(\frac{-\pi \times 50 \times 0.272}{5}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$S_1 \;\&\; S_2 = \pm j\sqrt{8.64} = \pm j\; 2.94 = \omega_n = 2\pi f_n$$

$$f_n = \frac{2.94}{2\pi} = 0.468\, Hz$$

مثال 6-2 :

مولد تزامني مفاعلته بنسبة الوحدة تساوي 1.2 ، يولد فولتية بتردد 50 هرتز. ربط هذا المولد إلى قضيب توزيع لانهائي فولتيته 1.0 بنسبة الوحدة عن طريق خط نقل ومحول مجموع مفاعلتيهما (0.6) بنسبة الوحدة . فو لتية اللاحمل للمولد 1.2 بنسبة الوحدة وثابت عزم القصور الذاتي له . جميع قيم المعطات بنسبة الوحدة تم حسابها على الأساس نفسه باهمال تأثير المقاومات وملفات الإخماد. احسب تردد التذبذب الناجم عن اشتغال المولد عند تعرضه لاضطراب صغيروهو محمل :

(أ) 50%،

(ب) 80%.

من حد القدرة القصوى .

الحل:

(أ) لتحميل قدره 50% :

نحسب في البداية معامل التزامن P_s :

$$\sin\delta_o = \frac{P_e}{P_m} = 0.5 \qquad \rightarrow \qquad \delta_o = 30°$$

$$P_s = \left.\frac{dP}{dt}\right|_{\delta=\delta_o} = \frac{|E|.|V|}{X} cos\,\delta_o = \frac{1.2\times 1.0}{1.2+0.6}\cos 30$$

$$\therefore P_s = 0.577\; p.u.$$

جذرا المعادلة S_1 و S_2 :

$$S_1\ \&\ S_2 = \pm\sqrt{\frac{-P_s}{M}} = \pm\left(\frac{-\pi f_s P_s}{H}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= \pm\left(\frac{-\pi\times 50\times 0.577}{4}\right)^{\frac{1}{2}} = \pm j4.76$$

$$S_1 \;\&\; S_2 = \pm j4.76 = \omega_n = 2\pi f_n$$

$$f_n = \frac{4.76}{2\pi} = 0.75Hz$$

(ب) لتحميل قدره 80% :

$$\sin\delta_o = \frac{P_e}{P_m} = 0.8 \qquad \rightarrow \quad \delta_o = 53.1°$$

$$P_s = \left.\frac{dP}{dt}\right|_{\delta=\delta_o} = \frac{|E|.|V|}{X} cos\,\delta_o = \frac{1.2 \times 1.0}{1.2+0.6}\cos 53.1$$

$$\therefore P_s = 0.4\;p.u.$$

جذرا المعادلة S_1 و S_2 :

$$S_1 \;\&\; S_2 = \pm\sqrt{\frac{-P_s}{M}} = \pm\left(\frac{-\pi f_s P_s}{H}\right)^{\frac{1}{2}} = \pm j3.96$$

$$S_1 \;\&\; S_2 = \pm\left(\frac{-\pi \times 50 \times 0.4}{4}\right) = \pm j3.96^{\frac{1}{2}}$$

$$S_1 \;\&\; S_2 = \pm j3.96 = \omega_n = 2\pi f_n \qquad \rightarrow f_n = \frac{3.98}{2\pi} = 0.63\;Hz$$

6- 3 تحليل إستقرارية الحالة الثابتة (المستقرة) عند وجود تأثير الإخماد

خلال فترة حدوث إضطراب بسيط فإن السرعة الزاوية للدوار تكون غير مساوية للسرعة الزاوية لمجال الساكن ($\omega_{مجال الساكن} \neq \omega_r$) ، عليه سوف يحدث فعل حث كما في المحرك الحثي بين الدوار والمجال الذي يدور بسرعة تزامنية الذي بدوره يؤدي إلى تولد عزم إخماد أو عزم إبطاء ليجعل الفرق بين ω_r و ω_s أقل ما يمكن .

فلو أخذنا تأثير الإخماد بعين الإعتبار فإن القدرة التي تسبب الاخماد P_d لكل وحدة سرعة زاوِيَة تتناسب طردياً مع الإنحراف بالسرعة ،

$$P_d \propto \frac{d\delta}{dt}$$

وإذا تم رفع علامة التناسب فإن

$$P_d = K_D \frac{d\delta}{dt}$$

حيث أن K_D هو معامل الإخماد ، عندئذ نستطيع كتابة معادلة التأرجح كالآتي

$$M\frac{d^2\delta}{dt^2} + K_D\frac{d\delta}{dt} + P_s(\Delta\delta) = \Delta P \qquad (6.15)$$

الاخماد الذي أخذناه بنظر الاعتبار هنا هو الاخماد الكهربائى نتيجة للتيارات الدوامية فى دوار المولد نتيجة لسرعة الإنزلاق : هذا ليس الاحتكاك الميكانيكي نتيجة للسرعة المطلقة والذي افترضنا أنه قد تم طرحه من قدرة التوربين . والحل العابر للمعادلة (6.15) يمكن ان نحصل عليه بفرض أنه في البداية يكون $\Delta P = 0$:

$$M\frac{d^2\delta}{dt^2} + K_D\frac{d\delta}{dt} + P_s(\Delta\delta) = 0 \qquad (6.16)$$

بقسمة المعادلة أعلاه على M

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + \frac{K_D}{M}\frac{d\delta}{dt} + \frac{P_s}{M}(\Delta\delta) = 0 \qquad (6.17)$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + \frac{\pi f_s K_D}{H}\frac{d\delta}{dt} + \frac{\pi f_s P_s}{H}(\Delta\delta) = 0 \qquad (6.18)$$

والمعادلة (6.18) التفاضلية من الدرجة الثانية غالبا ما تكتب رياضياً بالصيغة القياسية كما يأتي

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + 2\xi\omega_n\frac{d\delta}{dt} + \omega_n^2(\Delta\delta) = 0 \qquad (6.19)$$

حيث ω_n هو التردد الطبيعي بوحدة (rad/s)

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\pi f_s P_s}{H}} \qquad (6.20)$$

والعامل زيتا ξ هونسبة الإخماد

$$\xi = \frac{K_D}{2}\sqrt{\frac{\pi f_s}{HP_s}} \qquad (6.21)$$

وللإشغال الطبيعي للمنظومة يجب أن يكون ξ أصغر من 1 .حيث يكون جذرا المعادلة عددين مركبين وكما يأتي

التفاضلية ذات الدرجة الثانية يمكن الحصول عليها (6.19)المعادلة المميزة للمعادلة
نفسها من حيز الزمن إلى حيز التردد باستخدام تحويل لابلاس كالآتي(6.19)بتحويل المعادلة

$$s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \qquad (6.22)$$

ملاحظة : بالتحويل من حيز الزمن إلى حيز التردد تتحول المعادلة التفاضلية إلى معادلة جبرية خطية اعتيادية من الدرجة الثانية حيث يمكن حلها باستخدام القانون (الدستور) :

$$x = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

بتطبيق هذا القانون سوف يكون لدينا جذران مركبان للمعادلة كما يأتي

$$s_1 = -\xi\omega_n + j\omega_n\sqrt{1-\xi^2} = -\xi\omega_n + j\omega_d$$

$$s_2 = -\xi\omega_n - j\omega_n\sqrt{1-\xi^2} == -\xi\omega_n - j\omega_d$$

الحد التخيلي من هذه الجذوريعرف بكونه تردد اخماد التذبذب ويرمز له

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\xi^2}$$

على هذا الأساس وبناء على قيمة الجذر ستكون حركة الدوار على ثلاثة أنواع :

- حركة ناقصة عندما يكون الجذر موجباً ، أو
- حركة حرجة عندما يكون الجذر صفراً ، أو
- حركة مفرطة عندما يكون الجذر سالباً .

والحالات الثلاث المذكورة في أعلاه تكون مناظرة لقيم ξ إذا كانت : اقل من واحد فالحركة ناقصة، أومساوية لواحد فالحركة حرجة ، أو أكبرمن واحد فالحركة مفرطة

ومعامل الاخماد للاخماد الحرج K_{Dc} تكون قيمته هي

$$K_{Dc} = 2(MP_s)^{\frac{1}{2}} \tag{6.23}$$

الآن من الممكن أن نجعل المعادلة (6.19) عامة بحيث تشمل حل المنظومات ذات المكائن المتعددة وليست لماكنة واحدة كما في الشكل 6-1 السالف وذلك باستخدام طريقة متغير الحالة الرياضية *State- variable* بجعل

$$x_1 = \Delta\delta \quad , \quad x_2 = \Delta\omega = \Delta\dot{\delta}$$

عليه فان

$$\dot{x_1} = x_2 \quad , \ \dot{x_2} = -\omega_n^2 x_1 - 2\xi\omega_n x_2$$

المتغيران هنا هما $\Delta\delta$ و $\Delta\omega$ الذان نبحث عن حلهما معاً

بكتابة المعادلات أعلاه بصيغة المصفوفة

$$\begin{bmatrix} \dot{x_1} \\ \dot{x_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \tag{6.24}$$

أو أن

$$\dot{\boldsymbol{x}}\ (\boldsymbol{t}) = \boldsymbol{Ax}(\boldsymbol{t}) \tag{6.25}$$

حيث

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n \end{bmatrix} \tag{6.26}$$

هذه المعادلة معادلة متغير حالة متجانسة وغير مقيدة ، فإذا كنت x_1 و x_2 هما الاستجابتان المطلوبتان عليه فلابد أن نعرف متجه الإخراج y(t) بوصفه

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \tag{6.27}$$

$$y(t) = C\ x(t) \tag{6.28}$$

بأخذ تحويل لابلاس ينتج

$$s\mathbf{X}(s) - \mathrm{x}(0) = \mathbf{AX}(s)$$

أو أن

$$\mathbf{X}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathrm{x}(0) \qquad (6.29)$$

حيث

$$(s\mathbf{I} - \mathbf{A}) = \begin{bmatrix} s & -1 \\ \omega_n^2 & s + 2\xi\omega_n \end{bmatrix} \qquad (6.30)$$

بالتعويض عن قيمة $(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ في هذه المعادلة ينتج

$$\mathbf{X}(s) = \frac{\begin{bmatrix} s + 2\xi\omega_n & 1 \\ -\omega_n^2 & s \end{bmatrix}}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}(\mathbf{X})$$

عندما يحدث اضطراب مفاجئ للدوار بزاوية صغيرة $\Delta\delta_o$ فان الظروف الأولية تكون

$$x_1(0) = \Delta\delta_o$$

وكذالك

$$x_2(0) = \Delta\omega_o = 0$$

عليه فان

$$\Delta\delta(s) = \frac{(\mathrm{s} + 2\xi\omega_n)\Delta\delta_o}{(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} \qquad (6.31)$$

$$\Delta\omega(s) = \frac{\omega_n^2\,\Delta\delta_o}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \qquad (6.32)$$

وبأخذ معكوس تحويل لابلاس للمعادلتين أعلاه ينتج

$$\Delta\delta = \frac{\Delta\delta_o}{\sqrt{1 - \xi^2}}e^{-\xi\omega_n t}\ \sin(\omega_d t + \theta) \qquad (6.33)$$

حيث $\theta = \cos^{-1}\xi$

$$\Delta\omega = -\frac{\omega_n\Delta\delta_o}{\sqrt{1 - \xi^2}}e^{-\xi\omega_n t}\sin(\omega_d t) \qquad (6.34)$$

وحركة الدوار نسبة إلى دوران المجال الدائر بسرعة تزامنية

$$\delta = \delta_o + \frac{\Delta\delta_o}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_d t + \theta) \qquad (6.35)$$

والتردد الزاوي للدوار

$$\omega = \omega_o - \omega_n \times \frac{\Delta\delta_o}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_d t + \theta) \qquad (6.36)$$

وزمن الإستجابة الثابت يكون

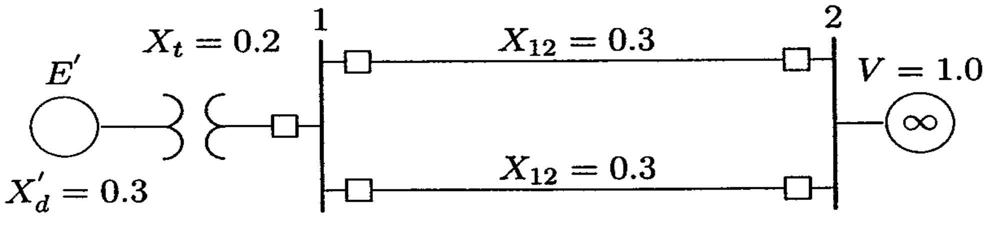
$$\tau = \frac{1}{\xi\omega_n} = \frac{2H}{\pi f_s K_D}$$

زمن الاستقرار يساوي أربع أمثال ثبت زمن الإستجابة

$$t_s \cong 4\tau$$

مثال 6-3 :

مولد تزامني مفاعلته العابرة X'_d بنسبة الوحدة تساوي 0.3 ، يولد فولتية بتردد 60 هرتز. ربط هذا المولد إلى قضيب توزيع لانهائي فولتيته 1.0 بنسبة الوحدة عن طريق دائرة مفاعلية بحتة كما في الشكل 6-6 حيث تم حساب قيم المفاعلات جميعها على الأساس نفسه . ثابت عزم القصور الذاتي للمحول H يساوي 9.95 MJ/MVA فإذا كان المولد يجهز قدرة حقيقية مقدارها 0.6 بنسبة الوحدة إلى قضيب التوزيع اللانهائي بعامل قدرة 0.8 متأخر وفرضنا أن معامل قدرة الإخماد بنسبة الوحدة هو 0.138. وحصل أن اضطرب دوار المولد اضطراباً بسيطاً (فمثلاً إنفصل قاطع الدائرة وأغلق بسرعة) بحيث أدى هذا الفعل إلى تغيير في زاوية الدوار $\Delta\delta = 10^o = 0.1745$ rad . أكتب معادلات رياضية تصف التغيير في زاوية الدوار وتردد المولد.



الشكل 6-6.

الحل:

مفاعلة الإنتقال بين المولد قضيب التوزيع اللانهائي

$$X = 03 + 0.2 + \frac{0.3}{2} = 0.65$$

القدرة الضاهرية بنسبة الوحدة

$$S = \frac{0.6}{0.8}\angle\cos^{-1}0.8 = 0.75\angle 36.87°$$

والتيار يكون

$$I = \frac{S^*}{V^*} = \frac{0.75\angle-36.87°}{1.0\angle 0°} = 0.75\angle-36.87°$$

فولتية المولد

$$E' = V + jXI = 1.0\angle 0° + j(0.65)(0.75\angle-36.87°) = 1.35\angle 16.79°$$

عليه فإن زاوية الدوار الأولية قبل التغيير هي $16.79° = 0.2931\ rad.$ لذا فإن معامل التزامن يكون

$$P_s = P_{max}\cos\delta_o = \frac{(1.35)(1)}{0.65}\cos 16.79° = 1.9884$$

التردد الزاوي غير المضمحل ونسبة التخميد

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\pi f_s P_s}{H}} = \sqrt{\frac{60\,\pi\times 1.9884}{9.94}} = 6.14\ rad/s$$

$$\xi = \frac{K_D}{2}\sqrt{\frac{\pi f_s}{HP_s}} = \frac{0.138}{2}\sqrt{\frac{\pi\times 60}{9.94\times 1.9884}} = 0.213$$

المعادلة الخطية غير المقيدة التي تعطي نمط التذبذب مع زاوية الدوار بالدرجات النصف قطرية

$$\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + 2.62\frac{d\Delta\delta}{dt} + 37.7\Delta\delta = 0$$

التردد الزاوي المخمد للتذبذب

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2} = 6.1405\sqrt{1-(0.2131)^2} = 6.0\ \text{rad/sec}$$

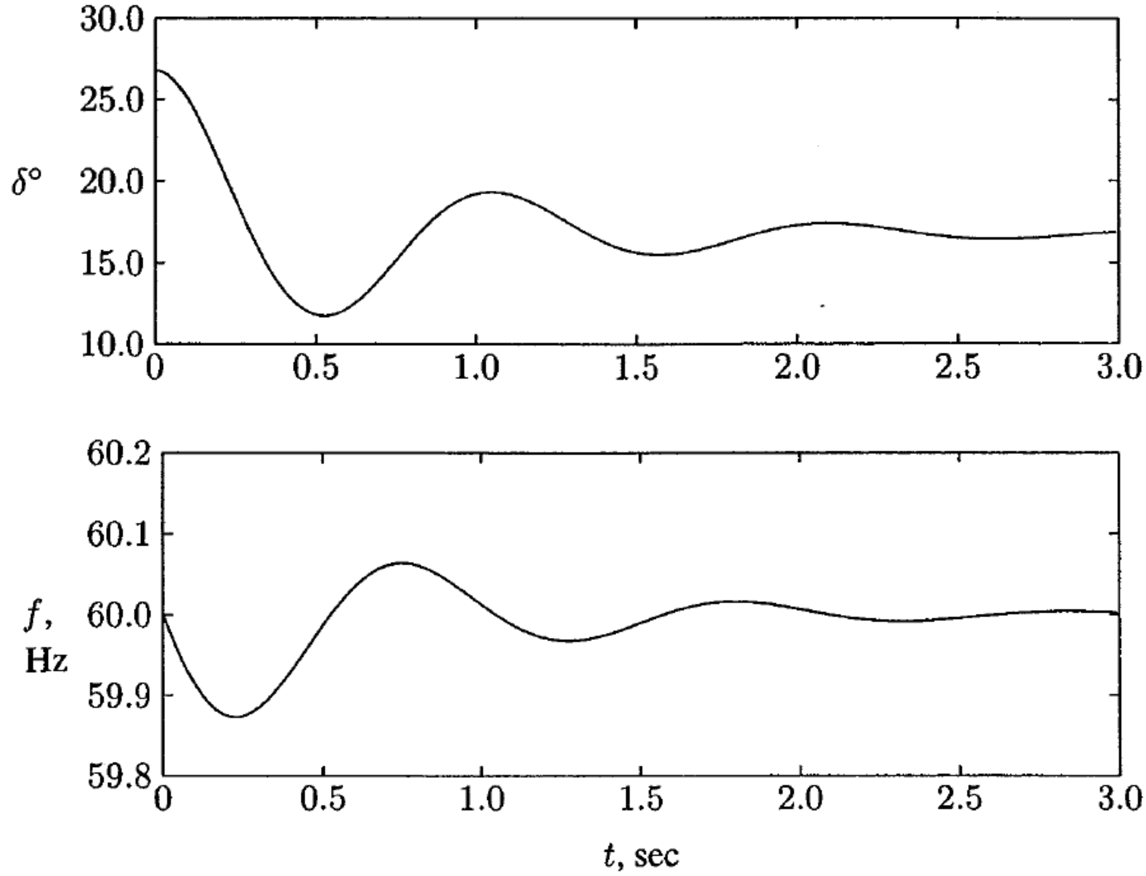
التردد المناظر المخمد

$$f_d = \frac{6.0}{2\pi} = 0.9549 \text{ Hz}$$

وأخيراً نجد أن

$$\delta = 16.79^\circ + 10.234e^{-1.3t} \sin(6.0t + 77.6966^\circ)$$
$$f = 60 - 0.1746e^{-1.3t} \sin 6.0t$$

ويبين الشكل 6-7 مخرجات الإستجابة لكل من زاوية الدوار وتردد المنظومة .



الشكل 6-7 الإستتجابة الطبيعية لزاوية الدوار والتردد للماكنة في المثال 6-3 .

في هذا المثال يلاحظ أن الإستجابة تظهر أن الإضطراب الصغير يتبعه تذبذب صغير نسبياً أو تأرجح صغير في الدوار قبل عودة الماكنة للإشتغال بالوضع الطبيعي لحالتها المستقرة للتزامن ، وقد يتطلب هذا الوقن بحدود من 2 إلى 3 ثانية في المولدات التوربينية . في المثال أعلاه يكون زمن اخماد التذبذب :

$$t_s \simeq 4\tau = 4(1/1.3) \simeq 3.1 \text{ seconds.}$$

أما تردد التذبذب f فيكون قليل بحدود 0.955 هرتز.

6-4 تصرف المنظومة عند زيادة مفاجئة طفيفة في القدرة

أفرض أن القدرة الداخلة للماكنة أزدادة بكمية صغيرة مفاجئة ΔP فإن معادلة التأرجح التي جعلت خطية تكون

$$\frac{H}{\pi f_s}\frac{d^2\delta}{dt^2} + K_D\frac{d\delta}{dt} + P_s(\Delta\delta) = \Delta P \qquad (6.38)$$

باعادة كتابة هذه المعادلة بصيغة المعادلة التفاضلية نحصل على

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + \frac{\pi f_s}{H}K_D\frac{d\delta}{dt} + \frac{\pi f_s}{H}P_s(\Delta\delta) = \frac{\pi f_s}{H}\Delta P$$

وبكتابة المعادلة أعلاه بالصيغة القياسية تكون

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + 2\xi\omega_n\frac{d\delta}{dt} + \omega_n^2(\Delta\delta) = \Delta u \qquad (6.39)$$

حيث

$$\Delta u = \frac{\pi f_s}{H}\Delta P \qquad (6.40)$$

بتحويل المعادلات أعلاه إلى متغير الحالة

$$x_1 = \Delta\delta \qquad , \qquad x_2 = \Delta\omega = \Delta\dot{\delta}$$

عليه فان

$$\dot{x_1} = x_2 \qquad , \qquad \dot{x_2} = -\omega_n^2 x_1 - 2\xi\omega_n x_2 + \Delta u$$

بصيغة المصفوفة

$$\begin{bmatrix}\dot{x_1}\\ \dot{x_2}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 1\\ -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0\\ 1\end{bmatrix}\Delta u \qquad (6.41)$$

أو أن

$$\dot{\boldsymbol{x}}\,(\boldsymbol{t}) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(\boldsymbol{t}) + \boldsymbol{B}\,\Delta\boldsymbol{u}(\boldsymbol{t}) \qquad (6.42)$$

هذه معادلة متغير حالة مقيدة بحالة لاصفرية ، رد فعلها يكمن بالمتغيرين x_1 و x_2 .

بأخذ تحويل لابلاس للمعادلة (6.42) مع إعتبار أن الظروف الأولية تكون صفراً

$$s\mathbf{X}(s) = \mathbf{A}\mathbf{X}(s) + \boldsymbol{B}\,\Delta\boldsymbol{u}(\boldsymbol{t}) \qquad , \quad \mathrm{x}(0) = 0$$

أو أن

$$\mathbf{X}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\Delta\boldsymbol{u}(\mathrm{s}) \tag{6.43}$$

بالتعويض عن قيمة $(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ في هذه المعادلة ينتج

$$\mathbf{X}(s) = \frac{\begin{bmatrix} s + 2\xi\omega_n & 1 \\ -\omega_n^2 & s \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}\frac{\Delta\boldsymbol{u}}{s}}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \tag{6.44}$$

$$\Delta\delta(s) = \frac{\Delta u}{s\,(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} \tag{6.45}$$

$$\Delta\omega(s) = \frac{\Delta u}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \tag{6.46}$$

بأخذ معكوس تحويل لابلاس للمعادلات أعلاه

$$\Delta\delta = \frac{\Delta u}{\omega_n^2}\left\{1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}}e^{-\xi\omega_n t}\sin(\omega_d t + \theta)\right\} \tag{6.47}$$

حيث :

$$\theta = \cos^{-1}\xi$$

$$\Delta\omega = \frac{\Delta u}{\omega_n\sqrt{1-\xi^2}}e^{-\xi\omega_n t}\sin(\omega_d t) \tag{6.48}$$

بالتعويض عن قيمة Δu من المعادلة (6.40) في المعادلتين (6.47) و (6.48) فإن حركة الدوار نسبة إلى المجال الدائر بسرعة تزامنية مقدراً بالزوايا النصف قطرية

$$\delta = \delta_o + \Delta\delta$$

$$\delta = \delta_o + \frac{\pi f_s}{H\omega_n^2}\Delta P\left\{1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}}e^{-\xi\omega_n t}\sin(\omega_d t + \theta)\right\} \tag{6.49}$$

وتكون سرعة الدوار بالزوايا النصف قطرية

$$\omega = \omega_o + \Delta\omega$$

$$\omega = \omega_o + \frac{\pi f_s}{\omega_n H\sqrt{1-\xi^2}}\Delta P\, e^{-\xi\omega_n t}\sin(\omega_d t) \tag{6.50}$$

مثال 6-4:

في المثال 6-3 السابق المولد يعمل في حالة الاستقرار بزاوية $\delta_o = 16.79°$ عندما ازدادت القدرة الداخلة إليه بكمية صغيرة مقدارها $\Delta P = 0.2\ p.u.$ أفرض أن فولتية المولد وفولتية قضيب التوزيع اللانهائي بقيا على القيم نفسها ؛ جد رد فعل زاوية الدوار وتردد المولد باستخدام المعادلتين (6.49) و (6.50) .

الحل : بتعويض قيم , $H, \delta_o , \xi\omega_n$ من المثال السابق في المعادلة (6.49)

$$\delta = 16.79° + \frac{180 \times 60 \times 0.2}{9.94 \times (6.1405)^2}\left\{1 - \frac{1}{\sqrt{1-(0.2131)^2}} e^{-1.3t} \sin(6t + 77.7°)\right\}$$

$$\delta = 16.79° + 5.763\{1 - 1.023\ e^{-1.3t} \sin(6t + 77.7°)\}$$

كذلك بالتعويض في المعادلة (6.50) نجد أن التردد يكون:

$$f = 6 + \frac{60 \times 0.2}{2 \times 9.94 \times 6.1405\sqrt{1-(0.2131)^2}} e^{-1.3t} \sin(6t)$$

أو أن

$$f = 60 + 0.1\ e^{-1.3t} \sin(6t)$$

الفصل 7 الإستقرارية العابرة TRANSIENT STABILITY

7-1 مقدمة

كما تمت الإشارة إليه في الفصل الثاني إن دراسات الإستقرارية العابرة بصورة عامة تتضمن تعرض منظومات القدرة الكهربائية إلى إضطرابات شديدة وقاسية مثل حدوث الأعطال على خطوط ومعدات النقل وفقدان وحدات التوليد وكذلك فقدان أحمال كبيرة . كل هذه الأمور تؤدي إلى إنحراف كبير في زاوية دوار الماكنة δ التي تؤدي بالتالي إلى فقدان الإستقرارية.

العوامل التي تتدخل في الاستقرارية العابرة تتضمن زوايا الأحمال للمكائن في اللحظة التي تسبق حالة الاضطراب ، كذلك فترة بقاء الاضطراب والقدرة التزامنية التي يمكن أن تتدفق بين المكائن بعد حدوث الاضطراب ، كذلك التحكم في تدفق البخار للتوربينات والاثارة المغناطيسية للمكائن خلال الاضطراب وبعده.

إن فترة تأثير الاضطراب لعطل منظومة معينة هو زمن إزلة العطل الذي يشمل مجموع أزمان تشغيل قواطع الدائرة وأجهزة الحماية . وفي بلدان العالم المتطورة تم تقليل أزمان الاشتغال هذه إلى حوالي 0.06 ثانية لتيارات عطل عالية. لكن التصاميم الجارية باستخدام البرمجيات الحديثة سوف تمكن من تقليل أزمان الاشتغال كلها إلى 0.04 ثانية مع أن هذه الازمان المقلَّلَة سوف تزيد كلفة قواطع الدائرة و أجهزة الحماية ؛ إلا أنها سوف تؤدي إلى توفير أكبر في تكاليف صناعة المولدات.

7-2 المعادلات الخاصة بدراسة الإستقرارية العابرة

كما تم بيانه في الفصل الرابع أن المعادلة التي تحكم حركة الماكنة التزامنية المربوطة إلى قضيب توزيع لا نهائي تكون ممثلة بمعادلة تفاضلية من الدرجة الثانية التي يطلق عليها " معادلة التأرجح"

$$M\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \qquad (7.1)$$

حيث

$$P_e = \frac{|E|.|V|}{X}.\sin\delta = P_{max}.\sin\delta \qquad (7.2)$$

بتعويض (7.2) في (7.1) ينتج

$$M\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_{max}.\sin\delta \quad (7.3)$$

لقد لوحظ مسبقاَ أن المعادلة (7.3) أعلاه هي معادلة تفاضلية غير خطية من الدرجة الثانية التي ليست لها حل تحليلي ما عدا إذا كانت في حالة غير حقيقية أي عندما $P_m = 0$. وللتأكد فيما إذا كانت الماكنة التزامنية في حالة استقرار حركي تحت ظرف عطل تتعرض له المنظومة كحدوث قصر دائرة أو فقدان مفاجئ للحمل يتم حل المعادلة (7.3) بالطرق العددية Numerical solution ويتم رسم الزاوية δ كدالة للزمن t خلال فترة العطل ، فإذا إتضح أن الرسم $\delta = f(t)$ خلال حدوث العطل يشير إلى أن δ تبدأ بالتناقص بعد أن تصل لقيمتها العظمى ، فإن المنظومة يفترض أن تكون مستقرة وتذبذب قيمة δ حول تقطة التوازن سوف يضمحل وينتهي ويؤول إلى الصفر.

ولأجل تبسيط حل المعادلة (7.3) غير الخطية يتم عادة عمل بعض الإفتراضات وهي :

- إهمال مقاومة خطوط النقل والمولدات .
- إهمال تأثير ملفات الإخماد في دوار الماكنة.
- إهمال جميع متسعات التوازي أينما وجدت .
- إهمال تأثير الأقطاب البارزة للمكائن التزامنية وتؤخذ المفاعلة العابرة للمحور المباشر X'_d للماكنة فقط لتمثيلها.
- يتم فرض أن فولتية الماكنة خلف المفاعلة العابرة هي التي تأخذ بعين الإعتبار .
- بقاء القدرة الداخلة P_m للمولد التزامني ثابتةً لا تتغير.

في ضوء الفرضيات الواردة في أعلاه سنقوم بدراسات حالات الإستقرارية العابرة كما في الفقرات التالية:

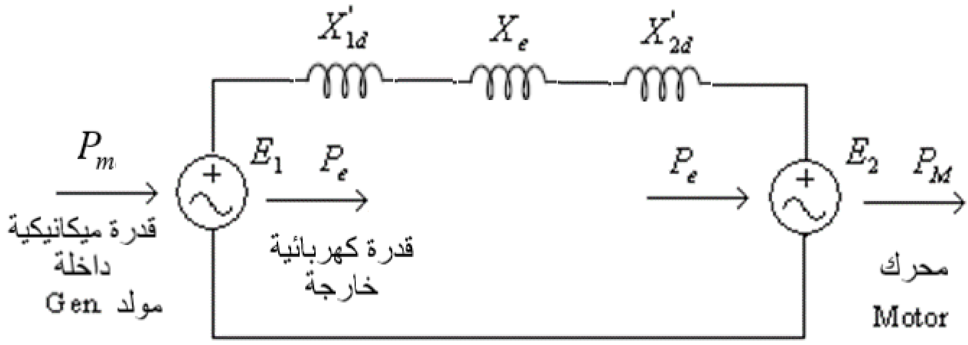
7-3 الإستقرارية العابرة لمنظومة تحتوي على ماكنتين

يبين الشكل 7-1 منظومة بسيطة تحتوي على ماكنتين مربوطتين خلال شبكة لها مفاعلة مكافئة X_e .

في هذا الشكل الماكنة رقم 1 هي مولد تجهز قدرة كهربائية P_e للماكنة رقم 2 التي هي بمثابة محرك.

X'_{1d} و X'_{2d} هما المفاعلتان العابرة للماكنة 1 والماكنة 2 على التعاقب .

E_1 و E_2 هما الفولتيات خلف المفاعلة التزامنية للماكنة 1 والماكنة 2 على التعاقب .



الشكل 7-1 منظومة تحتوي على ماكنتين.

في هذه المنظومة تم إهمال المفاقيد الكهربائية والميكانيكية كليهما. لذا فعند اشتغال المنظومة في الحالة المستقرة فإن القدرة الميكانيكية الداخلة لماكنة التوليد P_m تساوي القدرة الخارجة من الماكنة التي تشتغل كمحرك P_M . لذا فإن معادلة التأرجح للماكنة المولدة (الماكنة 1) تكون

$$\frac{d^2\delta_1}{dt^2} = \frac{P_m - P_e}{M_1} \tag{7.4}$$

ومعادلة التأرجح للماكنة 2 التي تشتغل كمحرك

$$\frac{d^2\delta_2}{dt^2} = \frac{P_e - P_m}{M_2} \tag{7.5}$$

بطرح المعادلة (7.5) من المعادلة (7.4) ينتج

$$\frac{d^2(\delta_1 - \delta_2)}{dt^2} = \frac{P_m - P_e}{M_1} - \frac{P_e - P_m}{M_2}$$
$$= \frac{M_2(P_m - P_e) - M_1(P_e - P_m)}{M_1. M_2}$$
$$= \frac{M_2(P_m - P_e) + M_1(P_m - P_e)}{M_1. M_2}$$
$$= \frac{M_2 + M_1}{M_1. M_2}(P_m - P_e)$$

هذه المعادلة يمكن كتابتها كالآتي

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{(P_m - P_e)}{M} \tag{7.6}$$

حيث أن

$\delta = \delta_1 - \delta_2$ هي زاوية العزم (زاوية القدرة) النسبية بين الماكنتين.

$M = \frac{M_2+M_1}{M_1.M_2}$ هو ثابت القصور الذاتي المكافئ للمنظومة.

يلاحظ أن المعادلة (7.6) هي نفسها معادلة التأرجح لماكنة واحدة مربوطة إلى قضيب توزيع لا نهائي.

7-4 أسلوب تغيرالزاوية δ خلال الإضطرابات

تم في الفقرة 6- 2 في الفصل السادس التطرق إلى ماكنة تزامنية مفردة مربوطة إلى قضيب توزيع لا نهائي كما في الشكل 6-1. حيث كانت القدرة المنتقلة من الماكنة إلى قضيب التوزيع اللانهائي بموجب المعادلة (6.2) فإن:

$$P_e = \frac{|E|.|V|}{X} \sin\delta = P_{max}.\sin\delta$$

حيث

$$P_{max} = \frac{|E|.|V|}{X}$$

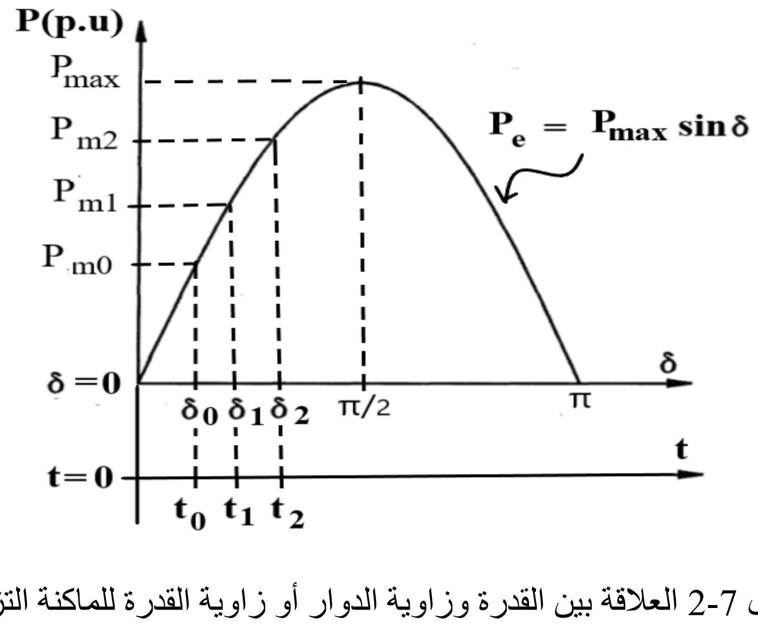
الشكل 7-2 يبين المنحنى الذي يعطي العلاقة بين القدرة وزاوية الدوار والمرسوم وفق المعادلة (6.2) أعلاه ، حيث سندرس من خلاله تصرف المنظومة إذا تعرضت لتغيير مفاجئ في القدرة الداخلة P_m.

أفرض أن منظومة قدرة تشتغل تحت ظروف طبيعية بحيث أن القدرة الميكانيكية الداخلة اليها :

القدرة الميكانيكية $P_m = P_{mo}$ $\rightarrow$ $\delta = \delta_o$ بزاوية قدرة

والقدرة الكهربائية الخارجة منها تكون

$$P_{eo} = P_{mo} = P_{max}.\sin\delta_o$$



الشكل 7-2 العلاقة بين القدرة وزاوية الدوار أو زاوية القدرة للماكنة التزامنية.

بالإشارة إلى الشكل 7-2 في أعلاه تأمل الأحداث التالية:

- عندما تزداد القدرة الميكانيكية الداخلة للماكنة فجأةً إلى P_{m1} كما في الشكل 7-2 عند زمن t_o فأعلى ، ففي هذه اللحظة وما بعدها لايمكن للزاوية δ أن تزداد فجأة بسبب القصور الذاتي لكتلة الدوار نفسه. لذا فإن القدرة الداخلة P_{m1} ستكون أكبر من القدرة الخارجة ($P_{m1} > P_{eo}$) وعليه سوف يبدء الدوار بالتسارع وتبدأ الزاوية δ بالازدياد وتتغير قيمتها من δ_o إلى δ_1 خلال زمن $t = t_1 - t_o$.
- عندما تصبح $\delta = \delta_1$ فإن القدرة الخارجة سوف تكون مساوية للقدرة الداخلة لكن الدوار هنا لا يمكنه التوقف ويستمر بالحركة بسبب عزم القصور الذاتي لكتلته لذلك سوف تبقى الزاوية δ تزداد إلى أن تصل قيمتها إلى δ_2 حيث تصبح القدرة الخارجة أقل من القدرة الداخلة ويبدأ الدوار بالتباطؤ ، أي أنه في هذه الحالة يصل تسارع الدوار إلى الصفر ويقف عند الزاوية δ_2 ثم يعود متأرجحاً إلى الزاوية δ_1 ويستقر عندها.

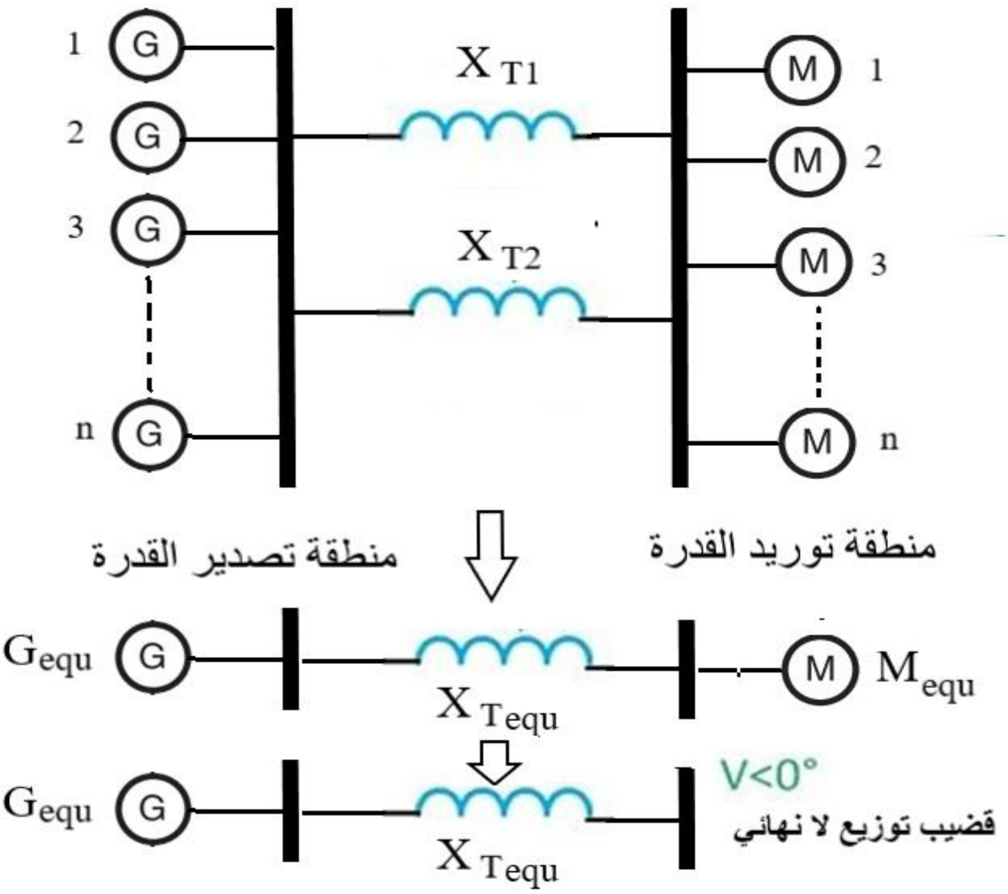
7-5 طرق حل الإستقرارية العابرة

إن معادلة التأرجح التي استخرجت آنفاً قد تستخدم لدراسات وحلول المسائل المتعلقة بالإستقرارية العابرة، على أية حال لما كان الاضطراب كبير فإن إنحراف الزاوية δ سيكون كبيراً أيضاً ،عليه فإنه لايمكن جعل معادلة التأرجح المذكورة خطية كما هو الحال في استقرارية الحالة المستقرة (الثابتة) ، حيث أنه في حالة الإستقرارية العابرة تكون معادلة التأرجح معادلة تفاضلية من الدرجة الثانية وغير خطية التي لايمكن حلها إلا بإحدى الطرق التالية :

1. الطرق المباشرة وهي طرق حل عددية وتشمل :
   - الحل بالخطوات (خطوة – خطوة أو نقطة – نقطة) وتكون بطريقتين :
     - الطريقة – I
     - الطريقة – II
   - الطريقة الرقمية (طريقة رنج كوتا Renge-Kutte Method)
   - طريقة ليابونوف المباشرة Liapunov’s Method
   - طريقة معدل التغير بالطاقة الحركية RAKE (Rate of change of kinetic energy)
2. الطرق غير المباشرة (طريقة المساحات المتساوية).

في هذه الطريقة ليست هناك حاجة لحل معادلة التأرجح ولهذا سميت بالطريقة غير المباشرة لحل مسائل الإستقرارية العابرة ، لكن تجدر الإشارة إلى أن هذه الطريقة تطبق على الماكنة المفردة فقط ولا يمكن تطبيقها على منظومة ذات مكائن متعددة.

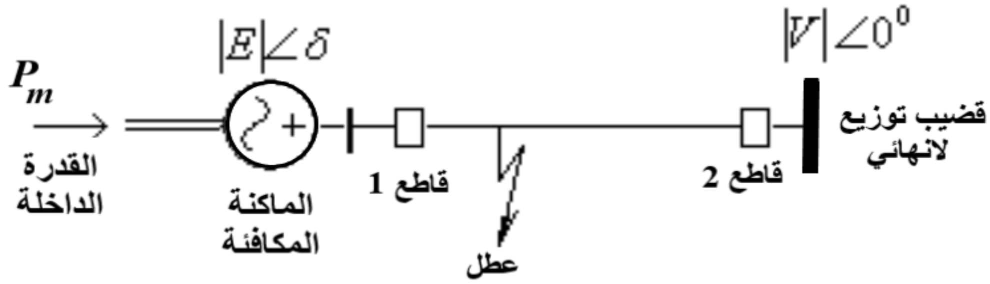
على أية حال فانه للمنظومة ذات المكائن المتعددة فان المكائن التي في منطقة تصدير القدرة يمكن أن يتم تمثيلها بماكنة واحدة مكافئة وذلك بجمع جميع المولدات التزامنية بمولد واحد مكافئ ، وبالاسلوب نفسه يمكن جمع جميع المكائن في منطقة توريد (استيراد) القدرة بماكنة مكافئة واحدة أيضاً (محرك) . هاتان الماكنتان المكافئتان يمكن أيضاً تمثيلهما إختصاراً بماكنة واحدة مفردة مربوطة إلى قضيب توزيع لانهائي كما في الشكل 7-3 .



الشكل 7-3 منظومة متعددة المكائن تختصر إلى ماكنة مفردة مربوطة إلى قضيب توزيع لا نهائي.

بعد تمثيل المنظومة بماكنة مفردة كما في الشكل 7-3 (نظام الماكنتان المكافئتان) يمكن في هذه الحالة إيجاد الاستقرارية لمنظومة قدرة (عادة يشار اليها بدراسة الإستقرارية) وكما يأتي:

بدايةً وقبل كل شيء يجري إعادة تبسيط رسم الماكنة المفردة المربوطة إلى قضيب التوزيع اللانهائي (الشكل 7-4) وافتراض حصول عطل على الخط الواصل بين الماكنة المكافئة المفردة وقضيب التوزيع اللانهائي .



الشكل 7-4.

من الرسم المذكور في أعلاه يتم الآتي:

(أ) من تحليل تدفق الأحمال ما قبل العطل نجد قيمة الفولتية خلف المفاعلة العابرة (E) وزاوية الدوار δ_0 نسبة إلى قضيب التوزيع اللانهائي .

(ب) نجد القدرة المنتقلة P_e خلال فترة العطل لعطل معين ، مع ملاحظة أن لعطل ثلاثي الطور تكون القدرة المنتقلة خلال فترة العطل تساوي صفراً ($P_e = 0$).

(جـ) استخدم معادلة التأرجح وزاوية البدء δ_o (المستخرجة قيمتها من الخطوة (أ) أعلاه) ، إحسب الزاوية δ كدالة للزمن (استخدم أية طريقة عددية لحل المعادلة التفاضلية اللاخطية).

(د) من الحل الذي تم الحصول عليه في أعلاه ، جد الزاوية التي عندها يتم إزالة العطل (الزاوية δ_1).

(هـ) بعد إزالة العطل ؛ أعد حساب القدرة المنتقلة P_e ثم حل معادلة التأرجح لإيجاد $\delta(t)$, بأخذ الزاوية δ_1 كظرف أولي مع ملاحظة أن القدرة المنتقلة تساوي صفراً ($P_e = 0$) بعد لحظة إزالة العطل تماماً.

(و) بعد إعادة توصيل خط النقل أعد حساب القدرة المنتقلة واستمر في حل معادلة التأرجح لإيجاد $\delta(t)$.

(ز) إذا ظهر أن $\delta(t)$ أخذت قيمتها العظمى وبدأت بالتناقص فهذا يدل على أن المنظومة مستقرة ، أما إذا ظهر عكس ذلك ، أي أن $\delta(t)$ بدأت بالإزدياد فمعنى هذا أن المنظومة تكون غير مستقرة .

7-6 حل الإستقرارية العابرة بالطرق المباشرة

7-6-1 حل بالخطوات (خطوة – بعد – خطوة) أو (نقطة – نقطة) - الطريقة – I

هذه الطريقة العددية لحل المعادلات التفاضلية غير الخطية لماكنة تزامنية واحدة مربوطة إلي قضيب توزيع لانهائي يمكن أيضاً استخدامها بصورة عامة لحل أية ماكنة منفردة ضمن منظومة متعددة المكائن.

كنا قد بينا سابقاً أن معادلة التأرجح للماكنة التزامية قد تكتب بالشكل الآتي

$$\frac{d^2\delta_1}{dt^2} = \frac{1}{M}(P_m - P_{max}.\sin\delta) = \frac{P_{acc}}{M} \qquad (7.7)$$

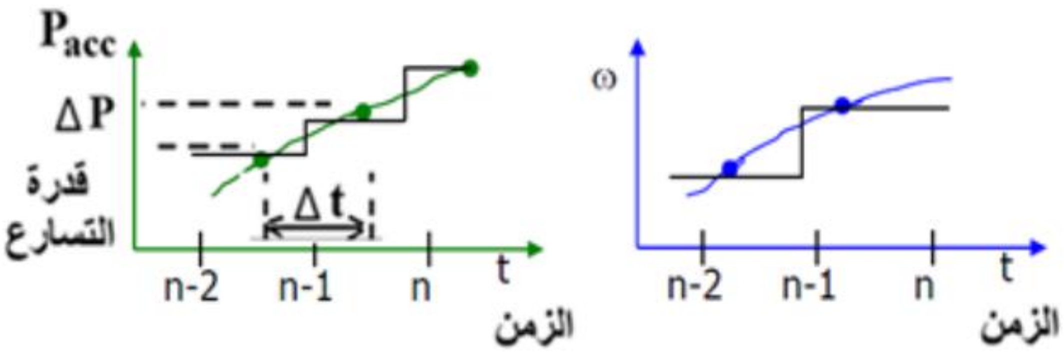
في الطريقة رقم – I يتم فرض أن قدرة التسارع P_{acc} تبقى ثابتة لفترة زمنية صغيرة Δt ، لذا فان $P_{acc} = \Delta P =$ ثابت $(constant)$ ، كما في الشكل 7-5 (أ) ، لذا فان

$$\frac{d^2\delta_1}{dt^2} = \frac{P_{acc}}{M} = \text{ثابت} \qquad (7.8)$$

لكن السرعة الزاوية

$$\omega = \frac{d\delta}{dt} = \int \frac{d2\delta}{dt^2}dt = \int \frac{P_{acc}}{M}dt \qquad (7.9)$$

$$\omega = \frac{P_{acc}}{M}t + \omega_o \qquad (7.10)$$



(ب) (أ)

الشكل 7- 5

في نهاية الفترة n تكون السرعة الزاوية

$$\omega_n = \frac{P_{acc}}{M}t + \omega_{n-1} \qquad (7.11)$$

التغير في ω خلال الفترة من n إلى n-1 أي خلال زمن $t = \Delta t$:

بإبدال $\omega_o = \omega_{n-1}$

$$\Delta\omega_n = \omega_n - \omega_{n-1} = \frac{P_{acc}}{M}\Delta t \qquad (7.12)$$

هذه المعادلة تعطي التغير في السرعة خلال الفترة n. أنظر الشكل 7-5(ب).

لإيجاد التغير في الزاوية δ نأخذ تكامل المعادلة (7.9)

$$\int d\delta = \int \frac{P_{acc}}{M}dt + \int \omega_o dt$$

$$\delta = \frac{P_{acc}}{M}t^2 + \omega_o t + \delta_o$$

الآن سوف نستبدل δ بـ δ_n و δ_o بـ δ_{n-1} وكذلك t بـ Δt ينتج

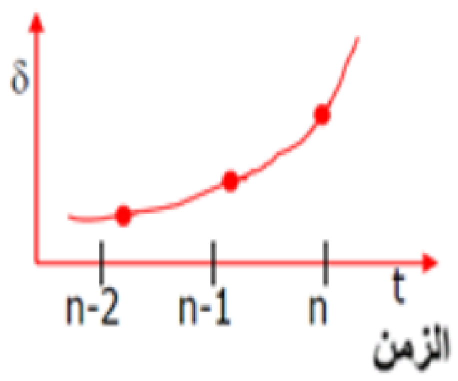
$$\delta_n = \frac{P_{acc(n-1)}}{M}\Delta t^2 + \omega_{n-1}\Delta t + \delta_{n-1}$$

لكن

$$\Delta\delta = \delta_n - \delta_{n-1}$$

عليه فان

$$\Delta\delta = \frac{P_{acc(n-1)}}{2M}\Delta t^2 + \omega_{n-1}\Delta t \qquad (7.13)$$



الشكل 7- 6

مثال 7-1:

مولد تزامني ثلاثي الطور 50 هرتز ،MVA 50 ، ثابت عزم القصور الذاتي H يساوي 4.5 MJ/MVA، فإذا كان المولد يعمل في حالته المستقرة و بقدرة داخلة وخارجة مقدارهما 0.7 بنسبة الوحدة وزاوية دوار 30 درجة نسبة إلى قضيب التوزيع اللانهائي. بسبب حصول عطل أصبح منحنى القدرة – الزاوية يمثل بالعلاقة $P_e = 1.0 \sin \delta$. أفرض أن القدرة الداخلة تبقى ثابتة ، جد ثم إرسم منحنى التأرجح باستخدام طريقة الخطوة بعد الخطوة رقم- 1 ، خذ فترة زمنية مقدارها $\Delta t = 0.05$ s للحل.

الحل :

$$M_{\text{بنسبة الوحدة}} = \frac{G_{\text{بنسبة الوحدة}}}{180f} \times H = \frac{1.0 \times 4.5}{180 \times 50} = 5 \times 10^{-4}$$

$$\Delta\omega_n = \frac{\Delta t}{M} P_{acc(n-1)} = \frac{0.05}{5 \times 10^{-4}} P_{acc(n-1)} = 100\ P_{acc(n-1)}$$

$$\Delta\delta = \frac{\Delta t^2}{2M} P_{acc(n-1)} + \omega_{n-1}\Delta t$$

$$\Delta\delta = \frac{0.05^2}{2 \times (5 \times 10^{-4})} P_{acc(n-1)} + 0.05\ \omega_{n-1}$$

$$\Delta\delta = 2.5\ P_{acc(n-1)} + 0.05\ \omega_{n-1}$$

في زمن = 0^+ $t\ (t_o)$، $\delta = 30^o$

$$P_{e(o)} = P_{max}.\sin\delta = 1.0 \sin 30° = 0.5\ p.u.$$

$$P_m = 0.7\ \ (\text{ثابت})$$

$$P_{acc(o)} = P_m - P_{e(o)} = 0.7 - 0.5 = 0.2\ p.u.$$

$$\Delta\omega = 100 \times 0.2 = 20$$

في زمن $t = 0^-$:

$$\omega_{n-1} = \frac{d\delta}{dt} = 0 = \omega_o$$

أي لا يوجد تغير في الزاوية δ .

$$\Delta\delta = 2.5\ P_{acc(o)} + 0.05\ \omega_o$$

$$\Delta\delta = 2.5\ \times 0.2 + 0.05\ \times 0 = 0.5°$$

$$\delta_1 = \delta_o + \Delta\delta_1 = 30 + 0.5 = 30.5°$$

في زمن $t_1 = 0.05 = t_o + \Delta t = 0 + 0.05 = 0.05$ ، تكون الزاوية $\delta = \delta o = 30.5°$ ، والقدرة الخارجة :

$$P_{e(1)} = P_{max}.\,sin\,\delta_1 = 1.0 \sin 30.5° \cong 0.51$$

قدرة التسارع :

$$P_{acc(o)} = P_m - P_{e(1)} = 0.7 - 0.51 = 0.19\,p.u.$$

$$\Delta\omega_1 = 100 \times 0.19 = 19$$

$$\omega_1 = \omega_o + \frac{P_{acc(o)}}{M}\Delta t = 0 + 100 \times 0.2 = 0.2$$

$$\Delta\delta_2 = 2.5\,P_{acc(1)} + 0.05\,\omega_1 = 2.5 \times 0.19 + 0.05 \times 0.2 = 1.48$$

$$\delta_2 = \delta_1 + \Delta\delta_2 = 30.5 + 1.48 = 31.98°$$

وهكذا نستمر في حساب السرعة وزاوية الدوار ونضع القيم الناتجة خطوة بعد خطوة في جدول كما يأتي:

δ	$\Delta\delta$	2.5Pacc	0.05ω	ω	Δω	Pacc	Pe	الزمن t بالثواني
30	0.5	0.5	0	0	20	0.20	0.5	+0
30.5	1.48	0.48	1.0	20	19	0.19	0.51	0.05
32	2.38	0.43	1.95	39	17	0.17	0.53	0.10
34.4	3.15	0.34	2.81	56.6	13.5	0.135	0.565	0.15
37.6	3.75	0.23	3.49	69.7	9.0	0.09	0.61	0.20
41.3	4.04	0.10	3.94	78.7	4.0	0.04	0.66	0.25
45.3	4.11	0.03-	4.14	82.7	1.0-	0.01-	0.71	0.30
49.4	3.94	0.05-	4.09	81.7	6.0-	0.06-	0.71	0.35
53.3	3.54	0.25-	3.79	75.7	- 10.0	0.10-	0.80	0.40

7-6-2 حل بالخطوات (خطوة – بعد – خطوة) أو (نقطة – نقطة)- الطريقة – II

في الطريقة رقم-1 تم الفرض بأن قدرة التسارع Pacc ثابتة خلال كل فترة زمنية Δt في القيمة التي تناظر لبداية الفترة تحت الدراسة ، لكن الحقيقة فان قدرة التسارع تكون بصورة عامة غير ثابتة وتكون معتمدة أو دالة للزمن . لذلك فان الأسلوب الأكثر دقة هو أن نأخذ معدل التسارع خلال الفترة الزمنية Δt ، أي نأخذ التسارع في منتصف الفترة الزمنية Δt . لذا فان حل معادلة التأرجح يمكن الحصول عليه بخطوات منفصلة عبر اختيار فترات زمنية صغيرة متساوية Δt مع أخذ بضع الفرضيات بعين الإعتبار كما يأتي:

- في كل بداية خطوة زمنية أفرض أن قدرة التسارع P_{acc} تبقى ثابتة من منتصف الخطوة الزمنية السابقة إلى منتصف الخطوة التي تحت الحل .
- أفرض أن السرعة الزاوية ω تكون ثابتة خلال أية خطوة زمنية ومساوية للقيمة التي تم حسابها في منتصف الخطوة الزمنية التي تحت الحل.

في نهاية الخطوة الزمنية ما قبل الأخيرة $(n-1)th$ مثلاً، تكون قدرة التسارع المحسوبة

$$P_{acc(n-1)} = P_m - P_{max}.\sin\delta_{n-1} \qquad (7.8)$$

والتغير الحاصل بالسرعة الزاوية $\Delta\omega$ نتيجة التغيير في قدرة التسارع $P_{acc(n-1)}$ يفرض بكونه ثابتاً خلال الفترة الزمنية Δt من النقطة $\left(n-\frac{3}{2}\right)$ إلى النقطة $\left(n-\frac{1}{2}\right)$ وهو :

$$\Delta\omega_{n-\frac{1}{2}} = \omega_{n-\frac{1}{2}} - \omega_{n-\frac{3}{2}} = \frac{\Delta t}{M}.P_{acc(n-1)} \qquad (7.9)$$

والتغير الحاصل في الزاوية δ في الخطوة الأخيرة للخطوة الزامنية $(n-1)th$ يكون

$$\Delta\delta_{n-1} = \delta_{n-1} - \delta_{n-2} = \Delta t.\omega_{n-\frac{3}{2}} \qquad (7.10)$$

وخلال الخطوة (الفترة) رقم n

$$\Delta\delta_n = \delta_n - \delta_{n-1} = \Delta t.\omega_{n-\frac{1}{2}} \qquad (7.11)$$

بتعويض (7.10) في (7.11) ينتج

$$\Delta\delta_n - \Delta\delta_{n-1} = \Delta t.\left(\omega_{n-\frac{1}{2}} - \omega_{n-\frac{3}{2}}\right) \qquad (7.12)$$

بإبدال التعبير

$$\left(\omega_{n-\frac{1}{2}} - \omega_{n-\frac{3}{2}}\right)$$

في المعادلات من (7.9) إلى (7.12) ينتج

$$\Delta\delta_n - \Delta\delta_{n-1} = \frac{(\Delta t)^2}{M} . P_{acc(n-1)}$$

من ذلك نجد

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + \frac{(\Delta t)^2}{M} . P_{acc(n-1)} \qquad (7.13)$$

أو أن

$$\delta_n = \delta_{n-1} + \Delta\delta_n \qquad (7.14)$$

من النتيجة أعلاه نلاحظ أنه في هذه الطريقة رقم - II لا حاجة لحساب السرعة الزاوية ω لإيجاد منحنى التأرجح كما هو الحال في الطريقة رقم -I .

مثال 7-2 :

أعد حل المثال السابق باستخدام الطريقة رقم - II . استعمل الفترة الزمنية $\Delta t = 0.05\ s$. ثم قارن بين نتيجة حل الطريقتين.

الحل :

$$M_{\text{بنسبة الوحدة}} = 5 \times 10^{-4}$$

$$P_{acc} = P_m - P_{max} . \sin\delta = 0.7 - 1.0\ \sin\delta$$

$$\frac{\Delta t^2}{M} = \frac{0.05^2}{(5 \times 10^{-4})} = 5.0$$

من المعادلة

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + 5.0 P_{acc(n-1)}$$

في الفنرة الزمنية $t = 0^-$، $0.7 = P_m$ ، $P_{acc} = 0$

في الفنرة الزمنية $t = 0^+$، $P_e = 1.0 \sin 30° = 0.5$

$$P_{acc} = 0.7 - 0.5 = 0.2$$

$$P_{acc(ave)} = \frac{0 + 0.2}{2} = 0.1\ p.u.$$

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta = 0 + 0.1 \times 5 = 0.5\ °$$

بعد مرور فترة $\Delta t = 0.05$ ثانية δ سوف تزداد من 30 درجة إلى 30.5 درجة ، في هذه الحالة :

$$P_e = 1.0 \, sin \, 30.5° = 0.51$$

$$P_{acc} = 0.7 - 0.51 = 0.19$$

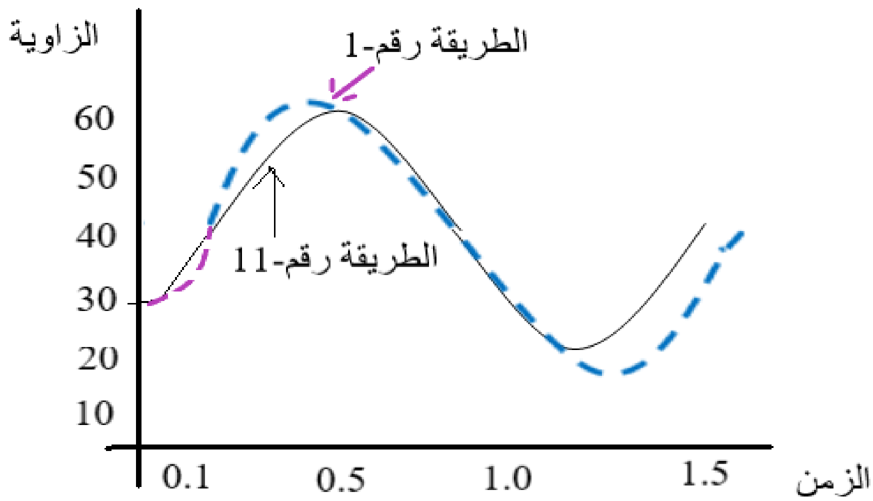
$$\delta_n = \delta_{n-1} + \Delta\delta_n$$

$$\Delta\delta = 0.5 + 0.19 \times 5 = 1.45°$$

$\therefore \delta = 30.5 + 1.45 = 31.95°$ وهكذا نستمر في حساب السرعة وزاوية الدوار ونضع القيم الناتجة خطوة بعد خطوة في جدول كما يأتي:

الزمن t بالثواني	Pe بنسبة الوحدة	Pacc = 0.7-Pe	5Pacc	$\Delta\delta$ درجة	δ درجة
-0	07	0.0	----	----	----
+0	0.1	0.5	----	----	----
0_{av}	----	0.5	0.2	---	30
----	----	----	----	0.5	----
0.05	0.51	0.91	0.95	----	30.5
---	----	----	----	1.45	----
0.1	0.53	0.17	0.85	----	31.95
---	----	----	----	2.30	----
0.15	0.563	0.137	0.69	----	34.25
-----	-----	------	------	2.94	-----
0.20	0.605	0.095	0.475	-----	37.24
-----	-----	----	-----	3.47	-----
0.25	0.652	0.048	0.239	----	40.71
----	-----	-----	-----	3.71	-----
0.3	0.7	0.0	0.0	----	44.42
----	-----	-----	-----	3.71	-----
0.35	0.745	- 0.045	- 0.223	-----	48.13

ويبين الشكل 7-7 رسماً تخطيطياً للمقارنة بين نتائج الطريقتين.



الشكل 7-7.

7-6-3 طريقة رنج- كوتا لحل معادلة التأرجح

بصورة عامة تعتمد طريقة رنج- كوتا على أساس متسلسلة تايلور التي تنص على :

$$y = y_o + \Delta x \frac{dy}{dx} + \frac{(\Delta x^2)}{2!}\frac{d2y}{dx^2} + \frac{(\Delta x^3)}{3!}\frac{d3y}{dx^3} + \cdots \ldots \ldots \ldots .. + \frac{(\Delta x^n)}{n!}\frac{dny}{dx^n}$$

حيث n = 1,2,3……..

وللمعادلة التفاضلية من الدرجة الأولى التي تكون بالصيغة :

$$\frac{dx}{dt} = f(x,t)$$

التي تستخدم لحل مسائل استقرارية منظومة القدرة بصورة عامة فان متسلسلة تيلور يمكن أن تكتب بالصيغة التالية :

$$x_1 = x_o + \Delta t\dot{x} + \frac{(\Delta t^2)}{2!}\ddot{x} + \frac{(\Delta t^3)}{3!}\dddot{x} + \cdots \ldots \ldots \ldots ..$$

صيغة المعادلة في طريقة رنج- كوتا من الدرجة الثانية لقيم x عند الفترة الزمنية $t = t_o + \Delta t$ تكون

$$x_1 = x_o + \Delta x = x_o + \frac{k_1 + k_2}{2}$$

حيث :

$$k_1 = f(x_o, t_o)\Delta t$$

$$k_2 = f(x_o + k_1, t_o + \Delta t)\Delta t$$

في هذه الطريقة تكون مكافئة لأن يؤخذ الحدان الأول والثاني من متسلسلة تايلوربعين الإعتبار فقط. لذا تكون الصيغة العامة لها

$$x_{n+1} = x_n + \frac{k_1 + k_2}{2}$$

حيث

$$k_1 = f(x_n, t_n)\Delta t$$

$$k_2 = f(x_n + k_1, t_n + \Delta t)\Delta t$$

معادلة التأرجح للماكنة التزامنية

$$\frac{2H}{\omega_s}\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_{max}.\sin\delta$$

هذه المعادلة يمكن أن تكتب بالصيغة

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2H}(P_m - P_{max}.\sin\delta)$$

هذه المعادلة يمكن تحويلها الى صيغة متغير الحالة باستخدام العامل التالي

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega_r.(\omega_s)$$

عليه فان معادلة التأرجح تصبح

$$\frac{d}{dt}\Delta\omega_r.(\omega_s) = \frac{\omega_s}{2H}(P_m - P_{max}.\sin\delta)$$

أو أن

$$\rho(\Delta\omega_r) = \frac{1}{2H}(P_m - P_{max}.\sin\delta)$$

حيث

$$\omega_s = 2\pi f_s$$

$\Delta\omega_r =$ إنحراف سرعة الدوار

$\rho = \frac{d}{dt}$ العامل

كذلك يمكن كتابة

$\rho(\delta) = \Delta\omega_r.\omega_s \qquad \rightarrow 314\Delta\omega_r$ في تردد 50 هرتز

لذا بإيجاد قيم $\Delta\omega_r$ و δ و t يمكن استخدام طريقة رنج – كوتا لحل مسائل استقرارية منظومة القدرة في المعادلات التالية :

$$(\Delta\omega_r)_{n+1} = (\Delta\omega_r)_n + \frac{k'_1 + k'_2}{2}$$

$$\delta_{n+1} = \delta_n + \frac{k''_1 + k''_2}{2}$$

$$t_{n+1} = t_n + \Delta t$$

مثال 7-3:

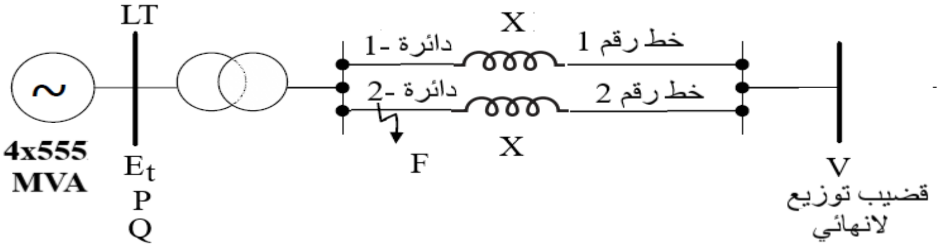
محطة توليد حرارية تحتوي على أربعة وحدات توليدية تزامنية سعة ومواصفات كل واحدة منها *555* MVA,24kV,60 Hz. ترفد قدرة الى قضيب توزيع لا نهائي عن طريق دائرتي نقل طاقة كما في الشكل 6-8. مفاعلة الشبكة المبينة في الشكل معطاة قيمتها بنسبة الوحدة محسوبة على الأساس *2222* MVA,24kV (منسوبة إلى جهة الفولتية المنخفضة لمحول فولتية رافع) . ظروف التشغيل الأولية للمحطة مع الكميات محسوبة بنسبة الوحدة على الأساس *2222* MVA,24kV هي كالآتي:

$P = 0.9$, $Q = 0.436$ (إثارة الماكنة زائدة) , $E = 1.0\ \angle 28.34°$. $V = 0.9008\ \angle 0°$

تم تمثيل المولدات الأربعة في المحطة بمولد مكافئ واحد بالثوابت التالية محسوبة على الأساس نفسه المكور في أعلاه (*2222* MVA,24kV) :

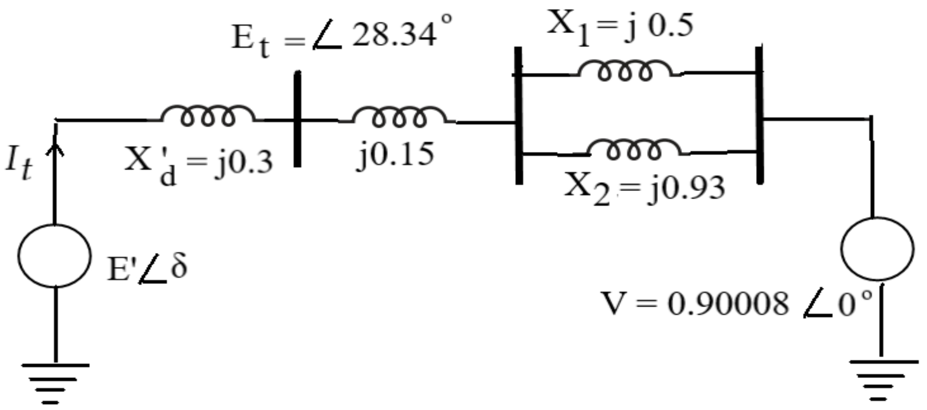
$$X'_d = 0.3 \qquad , \qquad H = 3.5\ MJ/MVA \qquad , \qquad k_d = 0.0$$

حصل عطل في الدائرة رقم 2 عند النقطة F، كما في الشكل 7-9، ثم تم إزالة هذا العطل . إحسب الإستجابة الزمنية (رد الفعل) لزاوية الدوار باستخدام طريقة رنج- كوتا ذات الدرجة الثانية.



الشكل 7-9

الحل : بتمثيل المولد المكافئ بالطريقة التقليدية تكون المنظومة كما موضحة في الشكل 7- 10.



الشكل 7- 10.

لظروف التشغيل الأولية

$$E' = E_t + X'_d . I_t$$

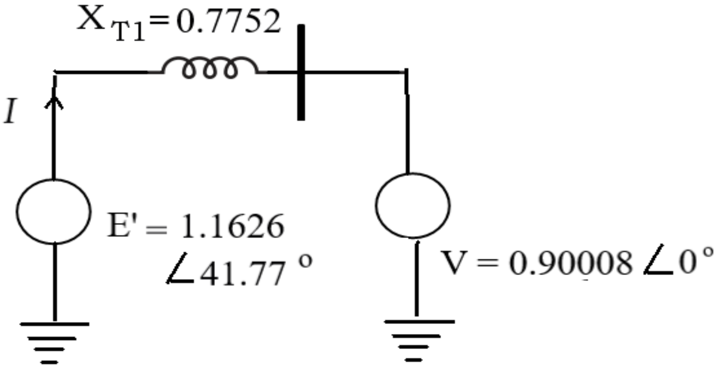
$$= 1.0 \ \angle 28.34° + j\ 0.3\ I_t$$

$$I_t = \frac{S^*}{V^*} = \frac{(P+Q)^*}{E_t^*} = \frac{(0.9 + j0.436)^*}{(1.0\ \angle 28.34°)^*} = \frac{0.9 - j0.436}{1.0\ \angle -28.34°}$$

$$\therefore\ E' = 1.0\ \angle 28.34° + j\ 0.3 \times \frac{0.9 - j0.436}{1.0\ \angle -28.34°} = 1.1626\angle\ 41.77°$$

$$\therefore\ \delta_o = 41.77°$$

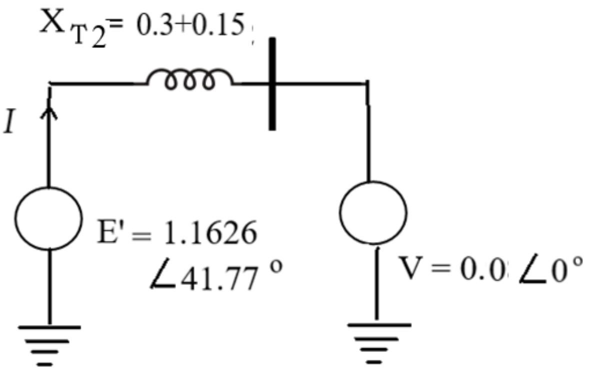
- قبل حدوث العطل كانت الدائرة المكافئة للمنظومة كما في الشكل 7 –11.



الشكل 7-11 الدائرة المكافئة للمنظومة قبل حدوث العطل.

.

- أثناء حدوث العطل :



الشكل 7-12.

$$P_e = \frac{|E|.|V|}{X_{T2}} \sin\delta = 0$$

- بعد زوال العطل :

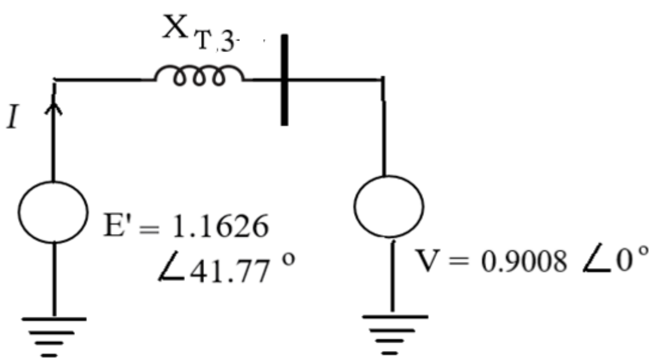
$$X_{T3} = X'_d + X_{tr} + X_L$$

$$X_{T3} = 0.3 + 0.15 + 0.5 = 0.95$$

$$P_e = \frac{|E|.|V|}{X_{T2}} \sin\delta$$

$$P_e = \frac{1.1626 \times 0.9008}{0.95} \sin\delta$$

$$P_e = 1.1024 \sin\delta$$



الشكل 7-13.

الإستجابة الزمنية باستخدام طريقة رنج – كوتا :

$$\rho(\Delta\omega_r) = \frac{1}{2H}(P_m - P_{max}.\sin\delta)$$

$$\rho(\Delta\omega_r) = \frac{1}{2 \times 3.5}(\,0.9 - P_{max}.\sin\delta)$$

$$\rho(\delta) = \omega_s.\Delta\omega_r = 2\pi \times 60\ \times \Delta\omega_r$$

$$\rho(\delta) = 377\Delta\omega_r$$

حيث أن

$$P_{max} = \begin{cases} 1.351 & \text{قبل العطل} \\ 0 & \text{أثناء العطل} \\ 1.1024 & \text{بعد العطل} \end{cases}$$

لكن لدينا $\delta_o = 41.77°$ ، ولدينا أيضاً : عند t = to، $\Delta\omega_r = 0$.
باستخدام طريقة رنج – كوتا :

$$(\Delta\omega_r)_{n+1} = (\Delta\omega_r)_n + \frac{k_1' + k_2'}{2}$$

$$\delta_{n+1} = \delta_n + \frac{k_1'' + k_2''}{2}$$

$$t_{n+1} = t_n + \Delta t$$

حيث :

$$k_1' = f(x_n, t_n)\Delta t$$

$$k_2' = f(x_n + k_1, t_n + \Delta t)\Delta t$$

$$k_1'' = \lfloor 377(\Delta\omega_r)_n \rfloor . \Delta t$$

$$k_2'' = \lfloor 377((\Delta\omega_r)_n + k_2') \rfloor . \Delta t$$

$$f(x_n, t_n) = \frac{1}{2H}(P_m - P_{max}. sin\delta_n)$$

$$= \frac{1}{2 \times 3.5}(0.9 - P_{max}. sin\, \delta_n)$$

$$= 0.1286 - \frac{1}{7.0} P_{max}. sin\, \delta_n$$

$$k_1' = f(x_n, t_n)\Delta t = 0.1286 - \frac{1}{7.0} P_{max}. sin\, \delta_n$$

$$k_1'' = \lfloor 377(\Delta\omega_r)_n \rfloor . \Delta t$$

$$k_2' = f(x_n + k_1, t_n + \Delta t)\Delta t$$

$$k_2' = \left[0.1286 - \frac{1}{7.0} P_{max}. sin(\delta_n + k_1'')\right] . \Delta t$$

$$k_2'' = \lfloor 377((\Delta\omega_r)_n + k_2') \rfloor . \Delta t$$

7-7 تأثير نوع وفترة وموقع دوائر القصر على الإستقرارية العابرة

من المعروف أنه في حالة حدوث قصر دائرة في أي جزء من المنظومة الكهربائية فان الفولتية في ذلك الجزء سوف تنهار قيمتها إلى الصفر مباشرة . هذا من شانه أن يسبب ضعف شديد في قابلية المنظومة على نقل القدرة خاصة في نقل القدرة المتفاعلة Q وكذلك سيسبب انخفاض كبير في القدرة الخارجة P_e. لذلك سيكون الفرق بين القدرة الداخلة والخارجة P_m-P_e كبير بحيث يؤدي ذلك إلى حدوث تسارع في دوار الماكنة والتوربين كليهما. ويبين الشكل 6- أقصى قدرة منتقلة وفترتها الزمنية في منظومة قدرة معرضة لعطل الدائرة القصيرة ونوعه .



الشكل 7-14.

الفصل 8 قاعدة المساحات المتساوية لحل الاستقرارية العابرة

Equal-area criterion for transient stability

8-1 مقدمة

كما بينا في الفصل السابع بأن إحدى طرق حل مسائل الإستقرارية العابرة غير المباشرة هي طريقة المساحات المتساوية .هذه الطريقة تعطينا القابلية على دراسة الإستقرارية العابرة لماكنة تزامنية مفردة بطريقة الرسم البياني وبدون اللجوء إلى حل معادلة التأرجح بالطرق العددية الصعبة التي تم بيانها في الفصل السابع نفسه.

إن طريقة المساحات المتساوية يمكن أن نبرهن على صحتها بعد أخذ الحقائق التالية بعين الإعتبار:

- تكون المنظومة غير مستقرة إذا بدأت الزاوية $\delta(t)$ بالإزدياد واستمرت كذلك بشكل غير محدود. بعبارة أخرى أن الدالة $\delta(t)$ تكون دائما متزايدة ، أي أن $0 < \frac{d\delta(t)}{dt}$.
- تكون المنظومة مستقرة إذا كانت $\delta(t)$ محددة . بعبارة أخرى $\delta(t)$ تصل إلى قيمة عظمى بعدها تبدأ بالتناقص وفي بعض اللحظات الزمنية لا يحدث خلالها أي تغيير في قيمتها $0 = \frac{d\delta(t)}{dt}$.

في منظومة القدرة إذا كانت الحاجة للقدرة تزداد بمعدل بطيء بحيث أن متحكمات التوربين يمكن ان تزيد في القدرة الداخلة بالمعدل نفسه وأن منظمات الفولتية الذاتية تستطيع أن تحافظ على فولتيات قضبان التوزيع فانه من المفترض أن المنظومة في هذه الظروف يمكن أن تشتغل لغاية حد الاستقرارية للحالة المستقرة أي أن طلب زيادة القدرة سيكون صفراً وزاوية الحمل $\delta = 90°$. أي أنه من الناحية العملية يجب أن تكون قدرة الحمل القصوى أقل من P_m بفرق أمان مناسب لكيلا تفقد المنظومة استقراريتها. ويعرف حد الاستقرارية لمنظومة قدرة ما هو القدرة القصوى (للحالة المستقرة) التي يمكن أن تنتقل خلال المنظومة بدون فقدان الاستقرارية. ويعتمد الحد كذلك على مقدار ونوع وفترة وموضع الاضطراب، أما عامل الاستقرارية فهو نسبة حد الاستقرارية إلى مقدارانتقال القدرة للحمل الفعلية .

8-2 برهان قاعدة المساحات المتساوية

تأمل الآن معادلة التأرجح لماكنة تزامنية مفردة مربوطة إلى قضيب توزيع لا نهائي كما تم شرحها في الفصول الرابع والخامس والسادس.هذه المعادلة قد أعطيت سلفاً بصيغتها القياسية كما يأتي

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_m - P_e}{M} = \frac{P_{acc}}{M} \quad (8.1)$$

حيث P_{acc} هي القدرة المعجلة أو قدرة التسارع .

بضرب طرفي المعادلة (8.1) أعلاه بالمقدار $\frac{2d\delta}{dt}$ نحصل على

$$2\left(\frac{d\delta}{dt}\right).\left(\frac{d^2\delta}{dt^2}\right) = \frac{2P_{acc}}{M}.\left(\frac{d\delta}{dt}\right) \quad (8.2)$$

وبأخذ التكامل لطرفي هذه المعادلة نجد

$$\left(\frac{d\delta}{dt}\right)^2 = \frac{2}{M}\int_{\delta_0}^{\delta} P_{acc}.\,d\delta \quad (8.3)$$

في هذه المعادلة ؛ الزاوية δ_0 هي زاوية القدرة (زاوية الدوار) الأولية التي كانت الماكنة تعمل بقيمتها قبل أن تبدأ بالتأرجح بسبب الإضطراب.

كما تمت الإشارة اليه سلفاً بأن حالة استقرار المنظومة تحدث عندما يكون التغير في قيمة الزاوية في بعض اللحظات الزمنية مع الزمن صفراً ، أي أن: $\frac{d\delta(t)}{dt} = 0$ ، وإذا تم تطبيق هذا الشرط على المعادلة (8.3) نجد أن شرط الإستقرارية للمنظومة يكون

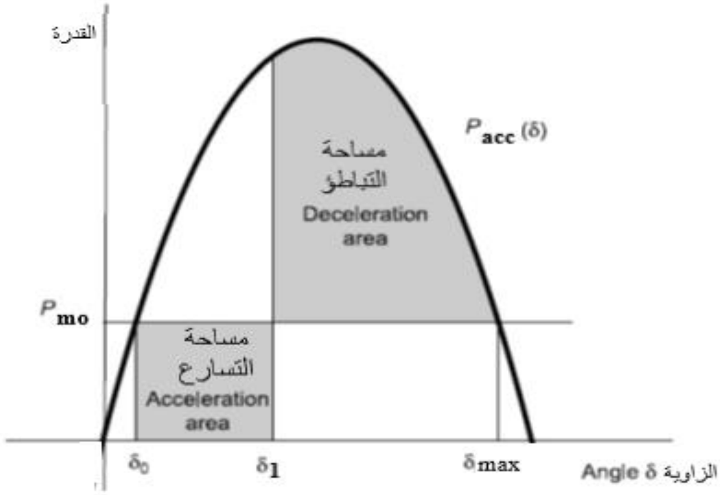
$$\frac{2}{M}\int_{\delta_0}^{\delta} P_{acc}.\,d\delta = 0$$

أو أن

$$\int_{\delta_0}^{\delta} P_{acc}.\,d\delta = 0 \quad (8.4)$$

أو بعبارة أخرى ، فان المنظومة تكون مستقرة إذا كانت المساحة P_{acc} (مساحة التسارع) والتي تتقلص قيمتها إلى الصفر في المخطط الذي يربط العلاقة بين القدرة وزاوية الدوار $P_{acc} = f(\delta)$.هذا يعني أن مساحة التسارع (Accelerating area) يجب أن تساوي مساحة التباطؤ (Decelerating) أو تكون أصغر منها في المخطط $P_{acc} = f(\delta)$ ، أنظر الشكل 8-1 .

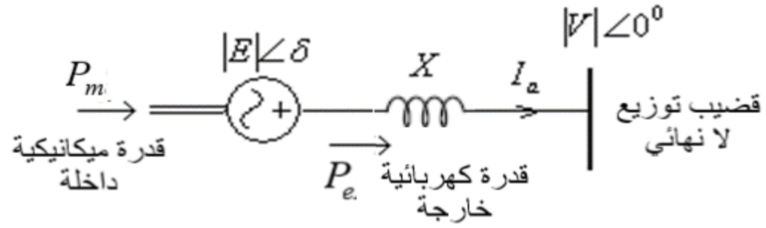
في الفقرات التالية سوف نستعرض أمثلة نموذجية حول تطبيق قاعدة المساحات المتساوية على بعض حالات الإضطراب لمنظومة حاوية على ماكنة مفردة مربوطة إلى قضيب توزيع لا نهائي.



الشكل 8-1 نظرية المساحات المتساوية.

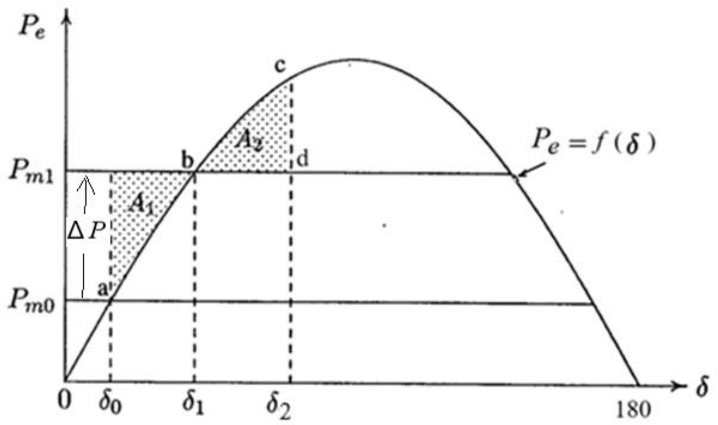
8.3 حالة التغير الكبير في الحمل نتيجة عمليات الفتح والغلق Switching operation

تأمل الآن مولد تزامني مفرد (يمثل منطقة تصدير قدرة) مربوط إلى قضيب توزيع لا نهائي كما في الشكل 8-2 . أفرض أن المنظومة في البداية تعمل بصورة مستقرة بزاوية قدرة δ_o وبقدرة داخلة مقدارها P_{mo} عندما تم فصل حمل كبير من المنظومة مقداره ΔP .



الشكل 8-2 مولد تزامني مفرد مربوط إلى قضيب توزيع لا نهائي.

إن شكل العلاقة بين القدرة P_e وزاوية القدرة δ لهذه المنظومة هي كما مبينة في الشكل 8-3 .



الشكل 8-3 التغيير الكبيرالمفاجئ في مقدار الحمل على المنظومة.

في حالة فصل الحمل فان القدرة الداخلة للمولد P_{mo} من التوربين لا وقت لها أن تتغير فجأة. أما القدرة الخارجة P_e فسوف تفقد كمية قيمتها بمقدار ΔP ، لذا فان القدرة الداخلة ستكون أكبر من القدرة الخارجة ، لذا سوف يبدأ الدوار بالتسارع وهذا يؤدي الى زيادة في زاويته δ .

إن القدرة التي ستسبب في تسريع الدوار ΔP وهي قدرة التسارع P_{acc} التي سوف تؤدي إلى تغيير زاوية الدوار من δ_o إلى δ_1 حيث تنخفض قيمتها إلى الصفر عند هذه الزاوية الجديدة في النقطة b. خلال هذه الفترة المتمثلة بالمساحة A_1 سوف يحصل الدوار على طاقة حركية إضافية تمكنه من تغيير زاويته إلى زاوية جديدة أخرى وهي δ_2 عند النقطة c . وعند هذه النقطة سوف يفقد الدوار طاقته الحركية المكتسبة وتبدأ سرعته بالهبوط ، وتمثل المساحة A_2 الطاقة المفقودة أو طاقة الإبطاء للدوار وعودته مرة أخرى إلى النقطة b ليستقر بعدها عند الزاوية δ_1. أما الزوية δ_2 فيمكن إيجاها بتطبيق الفرضية القائلة : الطاقة الحركية المكتسبة خلال تغير الزاوية من δ_o إلى δ_1 = الطاقة الحركية المفقودة خلال تغير الزاوية من δ_1 إلى δ_2 . أي أن

$$|A_1\text{المساحة}| = |A_2\text{المساحة}|$$

وهذه هي قاعدة المساحات المتساوية وهي الطريقة السريعة لتخمين استقرارية المنظومة وبيان حفاضها على وضع التزامن بطريقة سهلة وهي طريقة الرسم البياني.

ولأجل تمثيل المساحتين رياضياً ففي الشكل 8-3 تكون مساحة التسارع A_1 ومساحة التباطؤ A_2 كالآتي :

(8.6) مساحة التسارع
$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_{acc}) . d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_e) . d\delta$$

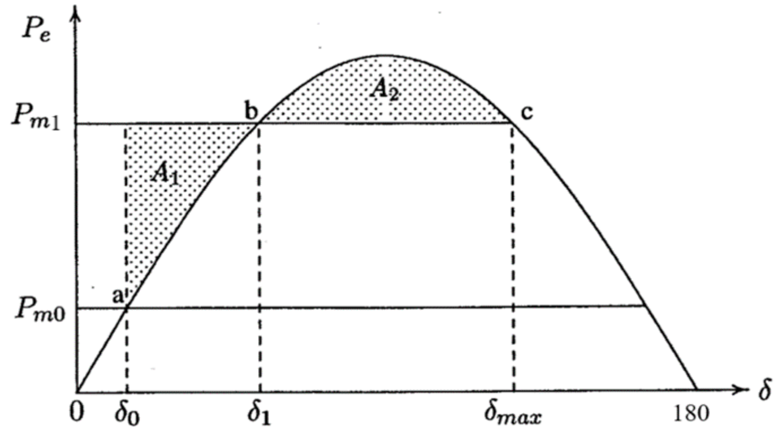
(8.7) مساحة التباطؤ
$$A_2 = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (-P_{acc}) . d\delta = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_e - P_m) . d\delta$$

لحالتنا هذه $P_m = P_{m1}$ وكذلك $P_e = P_{max} \sin \delta$.

ولأجل أن تكون المنظومة مستقرة يجب علينا أن نجد أقصى قيمة للزاوية δ_2 التي تجعل المساحتين A_1وA_2 متساويتين بحيث تتحمل المنظومة أقصى قيمة للتغير في القدرة ΔP بدون أن تفقد إستقراريتها . أي أنه حالما تزداد القدرة إلى P_{m1} فان هناك حالة تحديد تصل اليها عندما تصبح المساحة A_1 مساوية لأقصى قيمة للمساحة A_2 ، أنظر الشكل 8-4 . في هذه الحالة تحرز الزاوية δ_2 قيمتها القصوى δ_{max} بحيث أن:

$$\delta_2 = \delta_{max} = 180^0 - \delta_1 \tag{8.8}$$

فإذا لم تتجاوز الزاوية δ قيمة δ_{max} فإن الدوار سوف يعود ويستقر عند الزاوية δ_1 . بعد ذلك أية زيادة أخرى في القدرة الداخلة ΔP ستعني أن المساحة المتاحة A_2 ستكون أقل من المساحة A_1 وهذا يعني أن صافي طاقة التسارع تكون قيمتها موجبة أي أن سرعة الدوار تزداد في هذه الحالة مما يؤدي إلى أن المنظومة تكون غير مستقرة تماماً.



الشكل 8-4 أقصى قيمة للزاوية δ_2 لأستقرار المنظومة.

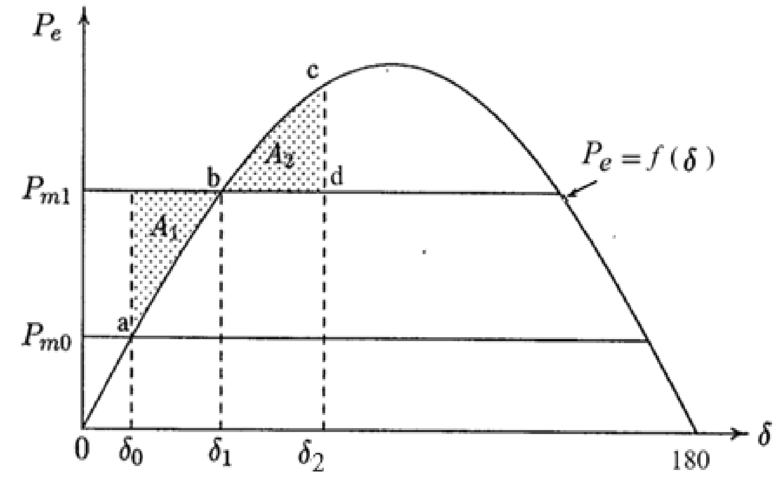
4-8 حالة التغير المفاجئ في مقدار القدرة الداخلة

في الشكل 8-2 الذي بينا فيه مولد تزامني مفرد مربوط إلى قضيب توزيع لا نهائي ، P_m هي القدرة الميكانيكية الداخلة للماكنة والمفاعلة X هي مجموع مفاعلة المولد التزامني العابرة X'_d زائداً مفاعلة الخط الرابط X_e ، أي أن $X = X_e + X'_d$.

في هذه الحالة أيضاً تكون القدرة المجهزة لقضيب التوزيع

$$P_e = \frac{|V|.|E|}{X}.\sin\delta \tag{8.5}$$

والشكل 8-5 يبين رسم لهذه العلاقة . في هذا الشكل تم الفرض على أن المنظومة تعمل في البداية عند النقطة a في حاة توازن مستقر بقدرة خارجة $P_e = P_{m0}$ وزاوية دوار مقدارها $\delta = \delta_0$. فاذا حصل أن ازدادت القدرة الداخلة بصورة مفاجئة إلى المقدار المتمثل بالخط الأفقي في الشكل 8-5 P_{m1} فان قدرة التسارع $P_{acc} = P_{m1} - P_e$ على الدوار ستكون موجبة.



الشكل 8-5 التغيير المفاجئ في القدرة الداخلة.

هذه القدرة المعجلة ستجعل الدوار يتسارع وتزداد زاويته δ إلى النقطة b التي عندها تصبح قدرة التسارع صفراً. لكن زاوية الدوارتستمر بالإزدياد بسبب عزم القصور الذاتي للمنظومة (الطاقة المخزونة في الدوار) حيث تصبح قدرة التسارع سالبة مما يؤدي إلى تباطؤ حركة الدوار . وعند النقطة c التي عندها تكون مساحة التسارع A_1 مساوية إلى مساحة التباطؤ A_2 ، أو أن :

$$\int_{\delta_0}^{\delta_2} P_{acc}.\, d\delta = A_1\text{المساحة} = A_2\text{المساحة}$$

عندها تصبح حركة الدوار صفراً (أو أن الدوار سوف يتحرك بسرعة ثابتة وهي السرعة التزامنية) بعدها تبدأ سرعة الدوار تكون سالبة بسبب أن قدرة التسارع تكون سالبة. أو بعبارة أخرى تزداد زاوية الدوار لتصل إلى أعظم قيمة لها وهي δ_2 ثم تبدأ بالتناقص وتمر بالنقطة b حيث تبدأ سرعة الدوار بالإزدياد مرة أخرى . لذا فان المنظومة تتذبذب حول النقطة b باتساع ذبذبي يتناقص باستمرار بسبب مكونات الإخماد التي لم تتم اضافتها في معادلة التأرجح ، وأخيراً تصبح المنظومة مستقرة عندما تصبح الزاوية $\delta = \delta_1$ وكذلك $P_e = P_{m1}$ (النقطة b).التي عندها تتساوى المساحتان

$$\left|A_1\text{المساحة}\right| = \left|A_2\text{المساحة}\right|$$

وتجدر الإشارة إلى أن حالة الزيادة المفاجئة في القدرة الداخلة تكون هي الحالة نفسها عند حصول تغيير مفاجئ في الحمل على المنظومة التي تم شرحها في الفقرة السابقة.

مثال 8-1: حالة التغير المفاجئ في مقدار القدرة الداخلة

مولد تزامني يجهز قدرة 50 MW إلى قضيب توزيع لا نهائي . القدرة العظمى التي تجهزها المنظومة $P_{max} = 100\ MW$. جد فيما إذا بقي المولد في حالة استقرار (تزامن) إذا حصل تغير مفاجئ في قيمة القدرة الداخلة اليه بحيث إزدادت بمقدار MW30 .

الحل:

منحنى القدرة – الزاوية معطى بالمعادلة

$$P_e = P_{max} sin\delta$$

لأيجاد قيمة الزاوية δ_o في النقطة a :

$$50 = 100 \sin \delta_o$$

$$\sin \delta_o = \frac{50}{100} = 0.5 \qquad \rightarrow \qquad \delta_o = 30° = 0.523\ rad.$$

نحسب الآن المساحتين A_1 و A_2 :

المساحة A_1 = المساحة (agb) – مساحة المستطيل (gbfe) – المساحة (abfe).

$$A_1 = (eg \times ef) - \int_{\delta_o}^{\delta_1} P_e\, d\delta = 80(\delta_1 - \delta_o) - \int_{\delta_o}^{\delta_1} 100 \sin \delta\, d\delta$$

$$= 80(0.927 - 0.523) + 100(\cos \delta_1 - \cos \delta_o) = 5.72\ MW.rad$$

المساحة A2 = المساحة (bmc) = مساحة المستطيل (bmcfh) – مساحة المستطيل (bcfh) .

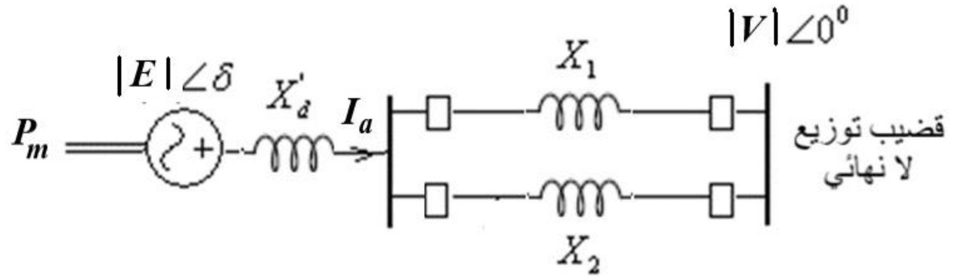
$$A_2 = \int_{\delta_o}^{\delta_1} P_e\, d\delta - 80(\delta_1 - \delta_o) = \int_{\delta_1}^{\pi-\delta_1} 100 \sin \delta\, d\delta - 80(\pi - 2\delta_1)$$

$$= -100(\cos(\pi - \delta_1) - \cos \delta_1 - 80(\pi - 2 \times 0.927) = 117\ MW.rad$$

بما أن المساحة A_2 أكبر من المساحة A_1 فانه يمكن اعتبار أن المنظومة مستقرة تماماً.

8-5 حالة فقدان مفاجئ لأحد خطوط النقل

يبين الشكل 8-6 ماكنة تزامنية مفردة مربوطة إلى قضيب توزيع لا نهائي عن طريق خطي نقل مربوطان على التوازي. عندما تعمل المنظومة في حالتها المستقرة وعندما يكون الخطان مربوطان فان المنحنى الذي يربط العلاقة بين القدرة وزاوية الدوار يعطى بالعلاقة



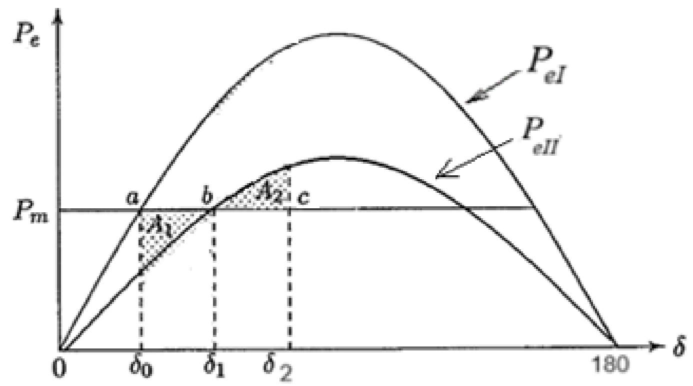
الشكل 8-6 ماكنة تزامنية مفردة مربوطة إلى قضيب توزيع لانهائي خلال خطي نقل متوازيين.

$$P_{eI} = \frac{|V|.|E|}{X_d' + X_1 \| X_2}.\sin\delta = P_{maxI}.\sin\delta \qquad (8.9)$$

الآن إذا تم فصل أحد الخطوط لسبب ما فان العلاقة بين القدرة وزاوية الدوار سوف تكون كالآتي

$$P_{eII} = \frac{|V|.|E|}{X_d' + X_1}.\sin\delta = P_{maxII}.\sin\delta \qquad (8.10)$$

لاحظ هنا أن القدرة الداخلة P_{mII} تكون أصغر من P_{mI} لما تكون $(X_d' + X_1)$ أكبر من $(X_d' + X_1 \| X_2)$. وكلا منحنيي العلاقة بين القدرة والزاوية المعرفان بالمعادلتين (8.9) و (8.10) مبينان في الشكل 8-7.



الشكل 8-7.

في بداية الأمر كانت المنظومة تعمل بانتقال قدرة ثابت $P_e = P_m$ بزاوية عزم δ_0 على المنحنى P_{eI} أي عند النقطة a مباشرة . وعند فصل الخط رقم 2 سيصبح منحنى الإشتغال الذي يربط العلاقة بين القدرة والزاوية هو المنحني الجديد P_{eII} ونقطة الإشتغال الكهربائية تنتقل فورياً إلى النقطة b . وطاقة التسارع

التي تناظرها المساحة A_1 سوف توضع في الدوار نفسه تتبعها قدرة التباطأ التي تناظرها المساحة A_2 ، حيث $A_1 = A_2$. وأخيراً تستقر المنظومة للعمل في النقطة c .

من الشكل 8-7 يمكن أن نتبين أنه كذلك إذا ازداد التحميل على المنظومة فإن القدرة الداخلة P_m سوف تنتقل للأعلى وتزداد المساحة A_1 لكن هذه الزيادة سوف تصل لحد معين بحيث تصبح فيه مساحة التباطؤ مساوية إلى مساحة التسارع $A_2 = A_1$ وهذا لايمكن حدوثه وبذلك تصبح المنظومة غير مستقرة.

ولحالة الحد للإستقرارية فإن الزاوية δ_2 تكون لها قيمة عظمى δ_{max} تعطى بالعلاقة :

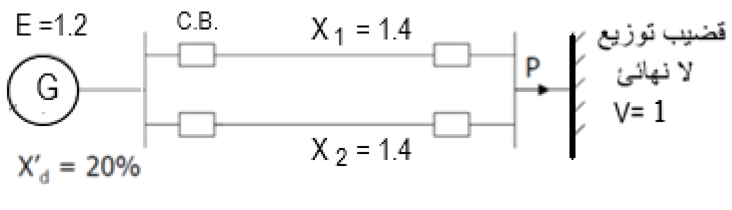
$$\delta_2 = \delta_{max} = 180^0 - \delta_1$$

مثال 2 : حالة فقدان مفاجئ لأحد خطوط النقل

للمنظومة المبينة في الشكل 8-8 ، الكميات المعطاة جميعها بنسبة الوحدة وكما يأتي:

$E=1.2$, $V=1.0$, $X'_d = 0.2$, $X_1 = X_2 = 0.4$

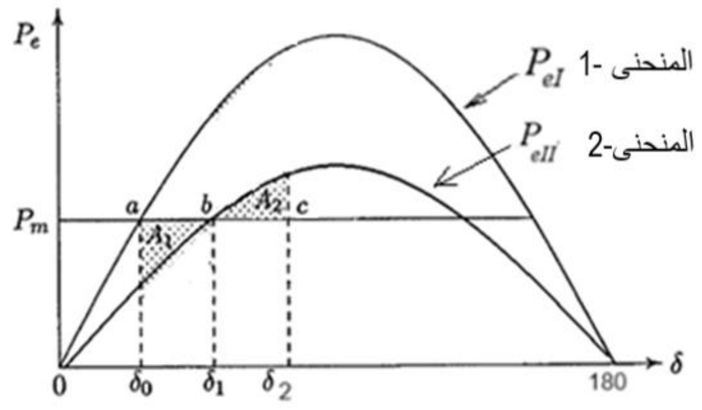
المنظومة كانت تعمل في حالة استقرار بقدرة داخلة $P_{mo} = 1.5$ بنسبة الوحدة عندما تم فصل أحد الخطوط بصورة مفاجئة . جد فيما إذا ستكون المنظومة في حالة استقرار بعد عملية فصل الخط . وإذا كانت المنظومة تبقى في حالة مستقرة فإحسب أقصى قيمة لزاوية تأرجح الدوار δ_2 .



الشكل 8-8.

الحل :

عندما كان الخطان يعملان سوية (المنحنى-1 في الشكل 8-9)



الشكل 8-9.

$$P_{eI} = \frac{|V|.|E|}{X'_d + X_1||X_2}.sin\,\delta = P_{maxI}.sin\,\delta$$

$$P_{eI} = \frac{1.0 \times 1.2}{0.2 + (1.4/1.4)}\ sin\,\delta = 3.0\ \ sin\,\delta$$

في البداية لما كانت الزاوية $\delta = \delta_o$ فإن القدرة كانت $P_{eI} = P_{mo} = 1.5$

$$3.0\ \ sin\,\delta_o = 1.5$$

$$sin\,\delta_o = \frac{1.5}{3.0} = 0.5 \qquad \Rightarrow \qquad \delta_o = 30° = 0.534\,rad.$$

عند انفصال أحد الخطين من الخدمة :

$$P_{eII} = \frac{1.0 \times 1.2}{0.2 + 1.4}\ sin\,\delta = 2.0\ \ sin\,\delta$$

الزاويتان δ_1 و δ_{max} يمكن أيجادهما من الشرط : $P_{eII} = P_{mo} = 1.5$

$$2.0\ \ sin\,\delta_1 = 1.5$$

$$sin\,\delta_1 = \frac{1.5}{2.0} = 0.5\ \rightarrow \quad \delta_1 = 48.6° = 0.848\,rad.$$

لكن العلاقة بين δ_1 و δ_{max} هي : $\delta_{max} = 180^0 - \delta_1$ ، لذا :

$$\delta_{max} = 180^0 - 48.6° = 131.4° = 2.293\,rad$$

لتحليل الإستقراية نجد المساحتين التسارع والتباطؤ من المعادلتين (8.6) و (8.7)

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_{mo} - P_{eII})\,.\,d\delta \qquad \text{مساحة التسارع}$$

$$A_2 = \int_{\delta_1}^{\delta_{max}} (P_{eII} - P_{mo}) \, . \, d\delta$$ مساحة التباطؤ

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_{mo} - P_{eII}) \, . \, d\delta = \int_{0.524}^{0.848} (1.5 - 2\sin\delta) \, d\delta$$

$$= 1.5\delta + 2\cos\delta \Big|_{0.524}^{0.848} = 0.0773$$

$$A_{2max} = \int_{\delta_1}^{\delta_{max}} (P_{eII} - P_{mo}) \, . \, d\delta = \int_{\delta_1}^{\delta_{max}} (2\sin\delta - 1.5) \, d\delta$$

$$= 2cos\delta - 1.5\delta \Big|_{0.848}^{2.293} = +0.478$$

ولما كانت المساحة $|A_{2max}|$ أكبر من المساحة $|A_1|$ عليه تكون المنظومة مستقرة.

لأيجاد أقصى قيمة لزاوية تأرجح الدوار δ_2 يجب أن نطبق الشرط :

$$A_2 = -A_1$$

$$\int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_{eII} - P_{mo}) \, . \, d\delta = -0.0773$$

$$\int_{\delta_1}^{\delta_2} -(2\sin\delta - 1.5) \, d\delta = -0.0773$$

$$2cos\delta + 1.5\delta \Big|_{0.848}^{\delta_2} = -0.0773$$

$$2cos\delta_2 + 1.5\delta_2 = 2.518$$

هذه المعادلة الناتجة هي معادلة رياضية متسامية Transcendental equation لايمكن حلها بالطرق الجبرية الإعتيادية ولكن يمكن أن تحل بالطرق العددية Numerical methods وذلك بطريقة الخطأ والصواب.حيث يتم فرض قيمة تقريبية للزاوية δ_2 وتعويضها في المعادلة الأخيرة إلى أن يتساوي طرفي المعا\لة الأيمن والأيسر كما ياتي :

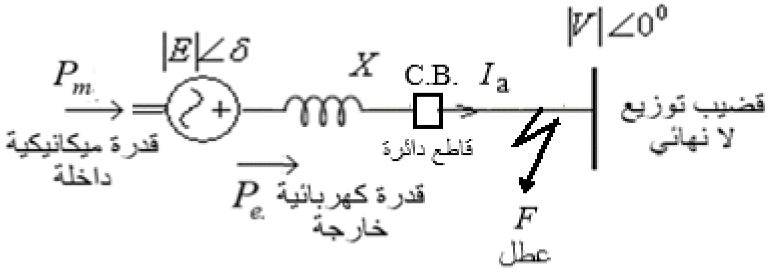
δ_2(بالدرجات .deg)	δ_2 (بالدرجات نصف القطرية .rad)	$2cos\delta_2 + 1.5\delta_2$	الطرف الأيسر
45°	0.785	2.5915	2.515
60°	1.046	2.570	2.515
70°	1.220	2.514	2.515

$$\therefore \delta_2 \cong 70°$$

8-6 حالات تعرض المنظومة لأعطال ثلاثية الطور

8-6-1 مولد تزامني مفرد

تأمل الآن مولد تزامني مفرد مربوط إلى قضيب توزيع لا نهائي كما في الشكل 8-10 . أفرض أن المنظومة في البداية تعمل بصورة مستقرة بزاوية قدرة δ_o وبقدرة $P_e = P_m$ ، أي $P_{acc} = 0$ ، عندما حصل عطل ثلاثي الطور على أطراف المولد في اللحظة الزمنية $t = t_o$.

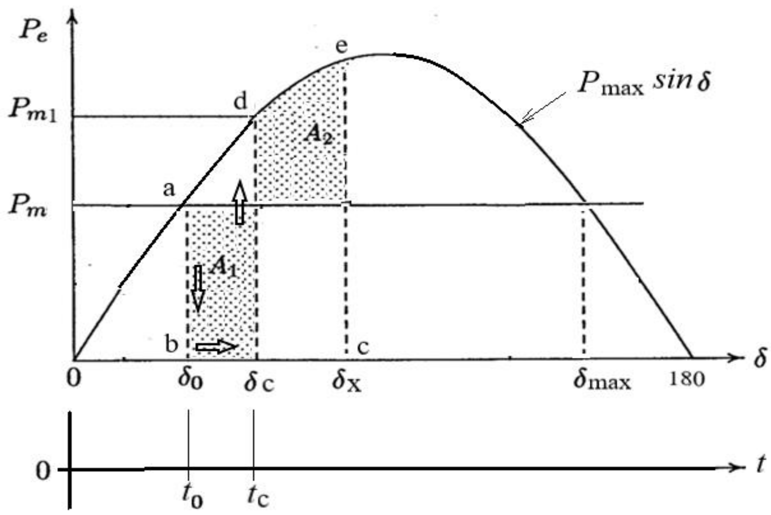


الشكل 8-10 مولد تزامني مفرد مربوط إلى قضيب توزيع لا نهائيمعرض لعطل قصر ثلاثي الطور.

في لحظة حصول العطل ستبقى القدرة الميكانيكية الداخلة P_m ثابتة لا تتغير أما القدرة الخارجة فتصبح صفراً ، $P_e = 0$ كما موضح في الشكل 8-11. وستكون القدرة المعجلة

$$P_{acc} = P_m - P_e = P_m - 0 = P_m$$

وهذه تمثل قدرة التسارع التي تجعل الدوار يزيد في سرعته.



الشكل 8-11.

نتيجة لحصول العطل فإن قاطع الدائرة C.B. سيقوم بفصل المولد لإزالة العطل في اللحظة الزمنية t = tc ، لكن تسارع الدوار يبقى ثابتاً كما في المعادلة :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_m - 0}{M} = \frac{P_{acc}}{M}$$

وخلال الفترة من t_o إلى t_c أي قبل إزالة العطل ستتزداد سرعة الدوار فوق السرعة التزامنية ω_s حيث ستكون سرعة الدوار الجديدة معطاة بالمعادلة التالية

$$\omega = \frac{d\delta}{dt} = \int \frac{d^2\delta}{dt^2} = \int_0^t \frac{P_{acc}}{M} dt = \frac{P_m}{M} t$$

ولما كانت $M = \frac{4H}{\omega_s}$ فإن

$$\omega = \frac{\omega_s}{4H} P_m\, t \tag{8.11}$$

من المعادلة (8.11) نجد أن سرعة الدوار تتغير مع الزمن بصورة طردية (تغير خطي) . ويمكن أيجاد قيمة زاوية الدوار δ كما يأتي :

$$\delta = \int \omega dt = \int \frac{\omega_s}{2H} P_m\, t\, dt$$

$$\therefore \delta = \frac{\omega_s}{4H} P_m\, t^2 + \delta_o \tag{8.12}$$

في لحظة إزالة العطل ($t = t_c$) تكون سرعة وزاوية الدوار :

$$\omega = \frac{\omega_s}{4H} P_m\, t_c \tag{8.13}$$

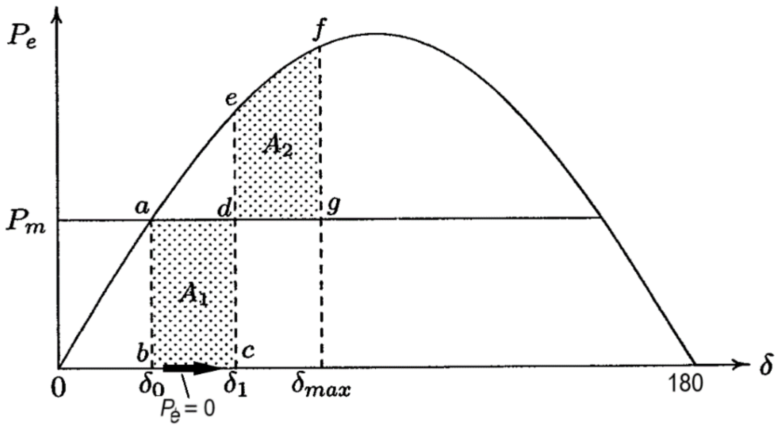
$$\delta = \frac{\omega_s}{4H} P_m t_c^2 + \delta_o = \delta_c \tag{8.14}$$

عندما تصبح الزاوية $\delta = \delta_c$ فإن العطل يزال تماماً وكذلك تعود قيمة القدرة الخارجة من المولد الى قيمة جديدة هي P_{e1} وهي قيمة أكبر من $P_m = P_{m1}$ عند النقطة b التي عندها تبدأ سرعة الدوار التباطؤ، وعندما تزداد P_e لتصل إلى النقطة e التي عندها تصبح الزاوية $\delta = \delta_x$ حيث يستمر الدوار بالتباطؤ إلى أن يعود إلى النقطة a التي عندها تكون :

مساحة التسارع A_1 = مساحة التباطؤ A_2

$$A_1 = \int_{\delta_o}^{\delta_c} (P_m - P_e) d\delta = A_2 = \int_{\delta_c}^{\delta_x} (P_e - P_m) d\delta$$

وبتطبيق قاعدة المساحات المتساوية أعلاه يمكننا إيجاد قيمة الزاوية δ_x التي يشار اليها في بعض المراجع بكونها الزاوية الحرجة δ_{cr} التي يخرج بعدها المولد التزامني عن التزامن . ولأجل إيجاد قيمة الزاوية الحرجة هذه فبالإشارة الي الشكل 8-10 عندما يكون العطل على أطراف المولد فسوف لاتكون هناك قدرة مرسلة إلى قضيب التوزيع اللانهائي ، أي أن $P_e = 0$ ويكون منحنى القدرة- الزاوية عبارة عن خط أفقي يمر بين النقطتين b و c . حينها يبدأ دوار الماكنة بالتسارع بسبب القدرة الميكانيكية الداخلة اليها P_m ويبدأ بخزن طاقة حركية مسببة في تغيير ملموس في الزاوية δ . وعندما تتم إزالة العطل بجهاز الحماية عند الزاوية δ_1 التي تنقل اشتغال الماكنة الى النقطة e كما مبين في الشكل 8-12 حيث يكون عندها صافي القدرة قدرة تعمل على إبطاء سرعة الماكنة وتبدأ القدرة المخزونة قبلها بالتبدد تدريجياً وتصبح قيمتها صفراً عند النقطة *f* التي عندها تصبح المساحة المنقطَة (*efdg*) المسماة A_2 مساوية للمساحة المنقطة (*abcd*) المسماة A_1 .

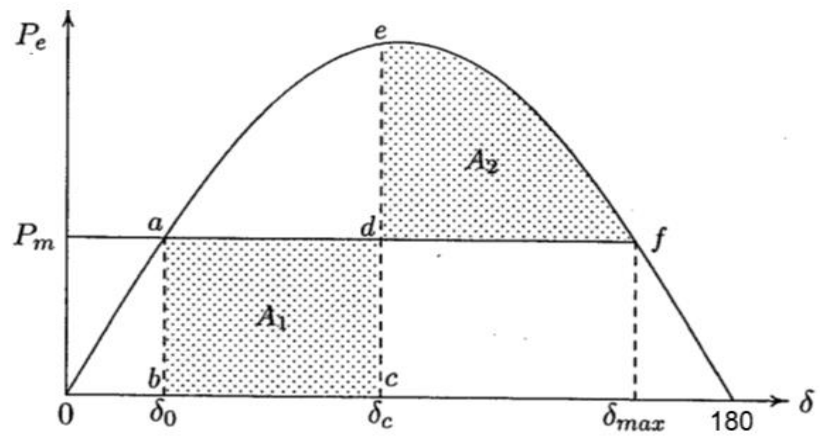


الشكل 8-12 .

لما كانت P_e باقية أكبر من P_m فسوف يستمر دوار الماكنة بالتباطؤ ويتخذ منحني القدرة – الزاوية مساره السابق بحيث يعود ماراً بالنقطة e ثم النقطة a وتبدأ زاوية الدوار للأمام والخلف بحيث تستقر في النهاية عند قيمتها الأولية δ_o .

إن زاوية الإزالة تصل عندما تزداد δ_1 زيادة أخرى بحيث تجعل مساحة التباطؤ A_2 أقل من مساحة التسارع A_1 وهذا يحدث عند الزاوية δ_{max} أي عند النقطة *f* في الشكل 8-13 عند تقاطع P_m مع منحنى القدرة – الزاوية.

بتطبيق قاعدة المساحات المتساوية إلى الشكل 8-13 نحصل على :



الشكل 8-13.

$$\int_{\delta_o}^{\delta_c} P_m d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_{max}} (P_{max} \sin\delta - P_m)\, d\delta$$

بأخذ تكامل الطرفين للمعادلة أعلاه ينتج

$$P_m.(\delta_c - \delta_0) = P_{max}(cos\,\delta_c - cos\,\delta_{max}) + P_m.(\delta_c - \delta_{max})$$

وإذا تم حل هذه المعادلة لأيجاد قيمة δ_c نحصل على

$$cos\,\delta_c = \frac{P_m}{P_{max}}(\delta_{max} - \delta_o) + cos\,\delta_{max} \qquad (8.15)$$

مثال 8-3 : حساب زاوية إزالة العطل

مولد تزامني مفرد مربوط إلى قضيب توزيع لا نهائي يدور بسرعة $\omega = 100\,\pi$ ، ثابت القصور الذاتي له H يساوي 2.5 والقدرة الداخلة إليه P_m تساوي 1.0 بنسبة الوحدة و القدرة الخارجة منه تساوي : $P_e = 2.4638\ \sin\delta$. حصل عطل مفاجئ على أطراف المولد وتم إزالته بزمن قدره 0.05 ثانية . جد قيمة الزاوية δ_c التي تم عندها إزالة العطل .

الحل :

نحسب الزاوية δ_o التي كان يعمل عندها المولد قبل حدوث العطل

$$P_{eI} = 2.4638\ \sin\delta_o = 1.0 = P_{mI}$$

$$\sin\ \delta_o = 0.4 \qquad \rightarrow \qquad \delta_o = 0.4174\, rad.$$

خلال العطل $P_{eI} = 0$ وكذلك $|V|$ تساوي صفراً

بعد العطل : في اللحظة

$$t = t_c = 0.05$$

وهي لحظة إزالة العطل.

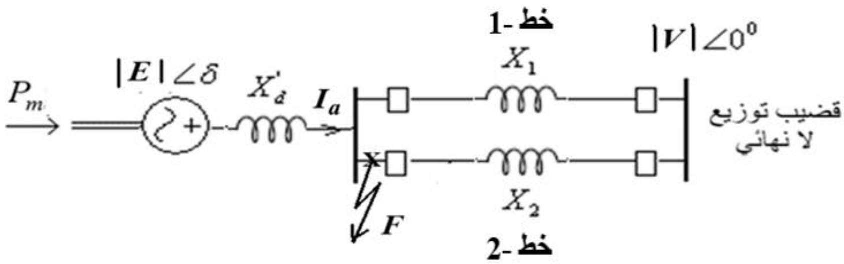
لإيجاد الزاوية δ_c من المعادلة (8.14) :

$$\delta_c = \frac{\omega_s}{4H} P_m t_c^2 + \delta_o = \frac{100\pi \times 1.0}{4 \times 2.5}(0.05)^2 + 0.4179 = 0.4964\, rad.$$

8-6-2 تعرض الخطوط التي تعمل على التوازي لعطل ثلاثي الطور

الحالة - 1 عندما يكون العطل في بداية أحد الخطوط

الشكل 8-14 يبين منظومة تحتوي على مولد تزامني مربوط إلى قضيب توزيع لا نهائي عن طريق خطي نقل مربوطان على التوازي وقد افترض أن هناك عطل قصر ثلاثي الطور حدث على بداية الخط رقم 2.



الشكل 8-14 ماكنة تزامنية مفردة مربوطة إلى قضيب توزيع لانهائي خلال خطي نقل متوازيين وقد حدث عطل ثلاثي الطور عند النقطة F .

قبل حدوث العطل فان منحنى القدرة – الزاوية يعطى بالمعادلة

$$P_{eI} = \frac{|V|.|E|}{X'_d + X_1||X_2}.\sin\delta = P_{mI}.\sin\delta$$

عند حدوث عطل ثلاثي الطور على المولد التزامني وعند بداية الخط رقم 2 فان المولد سوف يتم عزله من المنظومة وستصبح المنظومة كما مبينة في الشكل 8-15 .



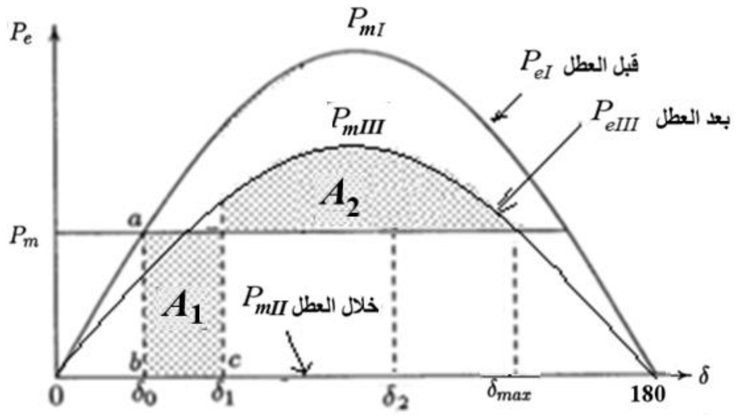
الشكل 8-15.

لذا فانه خلال العطل $P_{eII} = 0$ (تصبح القدرة الخارجة صفراً) وتبدأ حركة الدوار بالتسارع وتزداد الزاوية δ مما تتسبب الحالة بفقدان عملية التزامن ما لم يتم إزالة العطل في الوقت المناسب.

وإذا اشتغل قاطعا الدائرة في طرفي الخط رقم 2 المتعرض للعطل في الزمن t_1 (المناظر للزاوية δ_1) الذي يطلق عليه "زمن الإزالة" فان تدفق القدرة ستتم إعادته بواسطة الخط رقم-1 غير المتعرض للعطل ويصبح منحنى القدرة – الزاوية ممثلاً بالمعادلة التالية

$$P_{eIII} = \frac{|V|.|E|}{X'_d + X_1}.\sin\delta = P_{mIII}.\sin\delta$$

وستبدأ سرعة الدوار بالتباطؤ ، أنظر الشكل 8-16 .



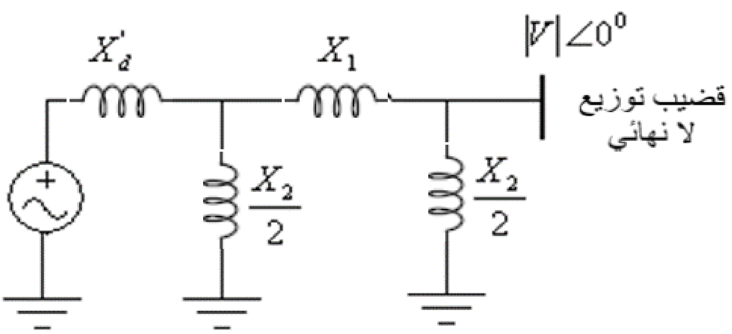
الشكل 8-16.

في هذه الحالة ستكون المنظومة مستقرة إذا وُجد أن مساحة التباطؤ A_2 مساوية لمساحة التسارع A_1 وأن δ تصل إلى أقصى قيمة مسموح بها δ_{max} . ولما كانت A_1 معتمدة على الزمن t_1 (المناظر للزاوية التي عندها يتم إزالة العطل δ_1) فان زمن إزالة العطل هذا يجب أن يكون أقل من قيمة معينة (زمن الإزالة الحرج) لكي تكون المنظومة مستقرة.

من الشكل 8-16 يمكن التبين بأنه كلما كانت القدرة الداخلة P_m في البداية أكبر فان مساحة التسارع A_1 تكون أكبر لزاوية إزالة معينة ، عليه فان جعل المنظومة مستقرة تستوجب عملية إزالة العطل بأسرع ما يمكن.

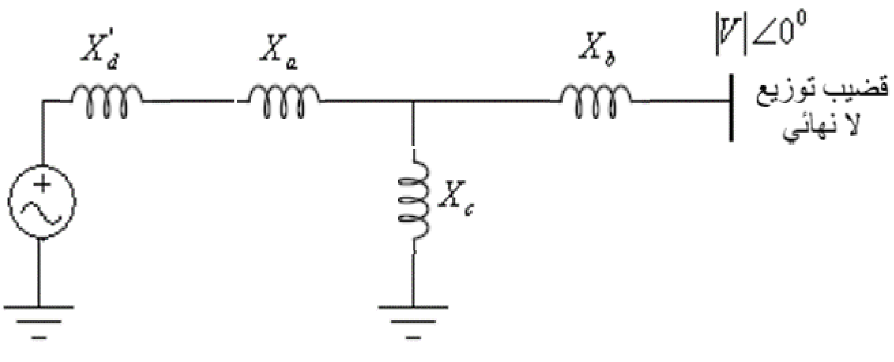
الحالة -2 عندما يكون العطل في منتصف الخط رقم-2

عندما يقع العطل بعيدا عن طرفي الخط رقم-2 (في منتصفه مثلاً) فان قسماً من القدرة سوف تتدفق خلال العطل وسيكون شكل دائرة المنظومة خلال العطل كما موضح في الشكل 8-17.



الشكل 8-17.

وباستخدام نظام تحويل الدوائر الكهربائية من الشكل المثلثي إلى الشكل النجمي (دلتا إلى ستار) تصبح الدائرة في الشكل 8-17 كما مبينة في الشكل 8-18 :



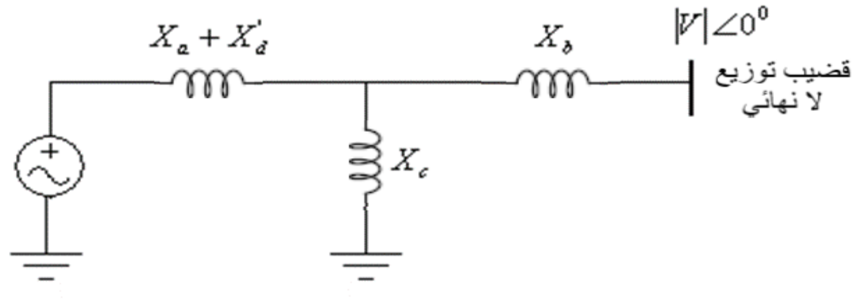
الشكل 8-18.

في هذه الدائرة :

$$X_a = X_b = \frac{X_1 . \frac{X_2}{2}}{X_1 + \frac{X_2}{2} + \frac{X_2}{2}} = \frac{X_1 . X_2}{2(X_1 + X_2)}$$

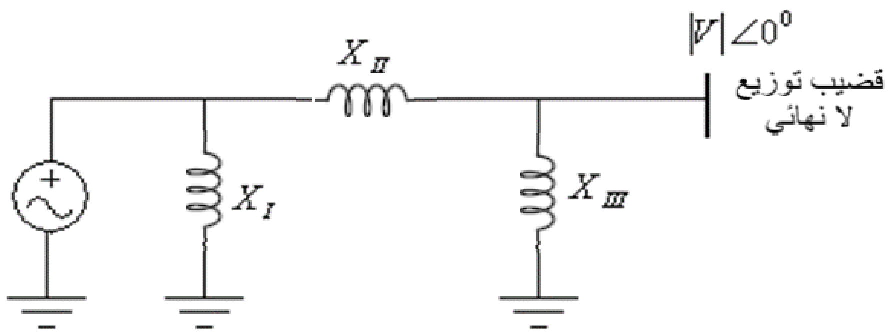
$$X_c = \frac{\left(\frac{X_2}{2}\right)^2}{X_1 + \frac{X_2}{2} + \frac{X_2}{2}} = \frac{(X_2)^2}{4(X_1 + X_2)}$$

أو أنها تصبح كما في الشكل 8- 19 الآتي:



الشكل 8-19.

هذه الدائرة يمكن تقليصها أكثر باستخدام تحويل نجمي إلى مثلي بحيث تبسط الى الدائرة التي في الشكل 8-20.



الشكل 8-20.

في هذه الدائرة :

$$X_I = \frac{(X_a + X'_d).X_b + (X_a + X'_d).X_c + X_b.X_c}{X_b}$$

$$X_{II} = \frac{(X_a + X'_d).X_b + (X_a + X'_d).X_c + X_b.X_c}{X_c}$$

$$X_{III} = \frac{(X_a + X'_d).X_b + (X_a + X'_d).X_c + X_b.X_c}{X_a + X'_d}$$

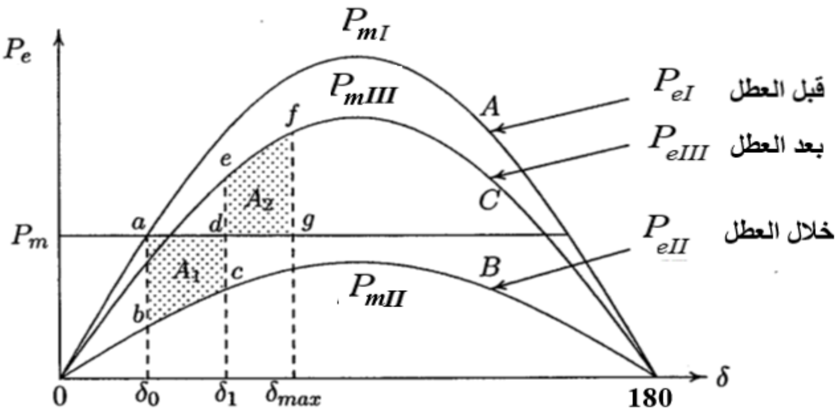
ويكون منحنى القدرة – الزاوية خلال العطل ممثلاً بالمعادلة

$$P_{eII} = \frac{|V|.|E|}{X_{II}}.\sin\delta = P_{mII}.\sin\delta$$

عندما يتم عزل الخط المتعرض للعطل فان تدفق القدرة سوف يستمرعن طريق الخط الآخر الصحيح بمنحنى القدرة – الزاوية الآتي

$$P_{eIII} = \frac{|V|.|E|}{X'_d + X_1}.\sin\delta = P_{mIII}.\sin\delta$$

ويبين الشكل 8-21 منحنيات القدرة – الزاوية الثلاثة P_{eI}و, P_{eII} , وكذلك P_{eIII}. نلاحظ من هذا الشكل أنه عند حصول العطل عند النقطة في منتصف الخط فان المفاعلة المكافئة بين قضبان التوزيع سوف تزداد بحيث يهبط منحنى القدرة – الزاوية إلى المنحنى B . وأخيراً ينتقل المنحنى إلى المنحنى C بعد زوال العطل .



الشكل 8-21.

من الشكل 8-21 نلاحظ أن مساحة التسارع A_1 المناظرة لزاوية إزالة عطل معطاة δ_1 هي اصغر في هذه الحالة من الحالة التي تمت مناقشتها في الفقرة 8-6-1 السابقة. أي أنها تعطي فرصة أفضل لأن تكون المنظومة مستقرة . كما أنه كلما ازدادت زاوية إزالة العطل δ_1 ازدادت المساحة A_1 . ولإيجاد الوضع الذي تتساوى فيه المساحات ($A_2 = A_1$) فان δ_2 تزداد الى أن تصل قيمتها δ_{max} التي هي أقصى قيمة مسموح بها لضمان استقرارية المنظومة.

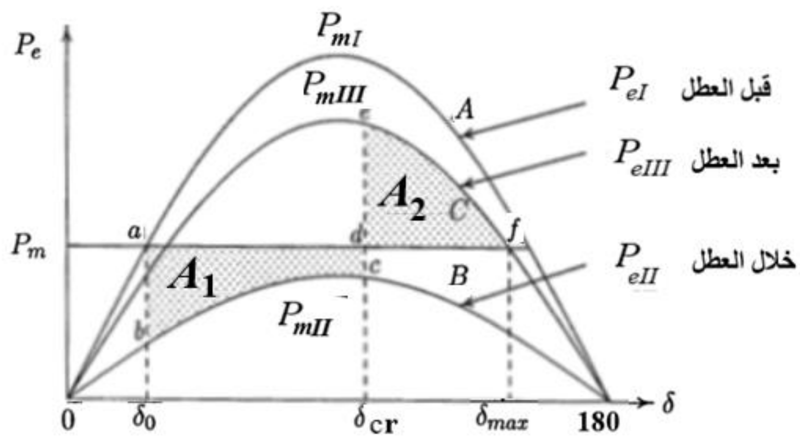
8-7 زاوية الإزالة الحرجة وزمن الإزالة الحرج للخطوط المتوازية

Critical clearing angle And Critical clearing time for parallel lines

إن زاوية الإزالة الحرجة δ_{cr} هي تلك الزاوية التي إن وصل إليها دوار الماكنة التزامنية خلال الإضطراب والتي تجعل المساحة التباطؤ A_2 ،التي تمثل طاقة التباطؤ، أصغر من المساحة A_1 ، التي تمثل طاقة التسارع. هذا يحدث عندما تكون الزاوية δ_{max} قد تقاطعت مع الخط P_m عند النقطة f كما في الشكل 8-22.

بتطبيق قاعدة المساحا ت المتساوية لإيجاد قيمة زاوية الإزالة الحرجة نحصل على

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (P_m - P_{mII}.\sin\delta)d\delta = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} (P_{mIII}.\sin\delta - P_m)d\delta$$



الشكل 8-22 قاعدة المساحا ت المتساوية لزاوية الإزالة الحرجة.

وحيث بالتماثل فإن

$$\delta_{max} = \pi - \sin^{-1}\left(\frac{P_m}{P_{mIII}}\right)$$

بتكامل طرفي المعادلة أعلاه

$$(P_m.\delta + P_{mII}.\cos\delta)|_{\delta_0}^{\delta_{cr}} = (-P_{mIII}.\cos\delta - P_m)|_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}}$$

أو أن

$$P_m.(\delta_{cr} - \delta_0) + P_{mII}.(\cos\delta_{cr} - \cos\delta_0)$$

$$= P_{mIII}.(\cos\delta_{cr} - \cos\delta_{max}) + P_m.(\delta_{cr} - \delta_{max})$$

ومن هذه النتيجة نستطيع إيجاد زاوية الإزالة الحرجة كالآتي

$$\cos \delta_{cr} = \frac{P_m.(\delta_{max} - \delta_0) - P_{mII}.\cos \delta_0 + P_{mIII}.\cos \delta_{max}}{P_{mIII} - P_{mII}}$$

أما زمن الإزالة الحرج المناظر لزاوية الإزالة الحرجة فيمكن أيجاده كالآتي:

من المعادلة (8.14) التي تربط العلاقة بين الزاوية δ_c والزمن t_c

$$\delta_c = \frac{\omega_s}{4H} P_m t_c^2 + \delta_o$$

فإذا كانت δ_c في هذه المعادلة تمثل زاوية الإزالة الحرجة δ_{cr} نفسها فإن زمن الإزالة الحرج المناظر لها سيكون :

$$\delta_{cr} = \frac{\omega_s}{4H} P_m t_{cr}^2 + \delta_o \qquad (8.16)$$

أي أن

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{cr} - \delta_o)}{\omega_s P_m}} \qquad (8.17)$$

8-8 حالة وجود قواطع دائرة ذات إعادة الغلق الذاتي

إذا كان العطل من النوع العابر المؤقت غير الدائم فان قاطع الدائرة على الخط رقم – 2 في الفقرة 8-5-2 سيعيد إيصال الخط تلقائياً ، وسيصبح انتقال القدرة مرة أخرى ممثلاً بالمعادلة التالية :

$$P_{eI} = \frac{|V|.|E|}{X_d' + X_1 \| X_2} . \sin \delta = P_{mI}.\sin \delta$$

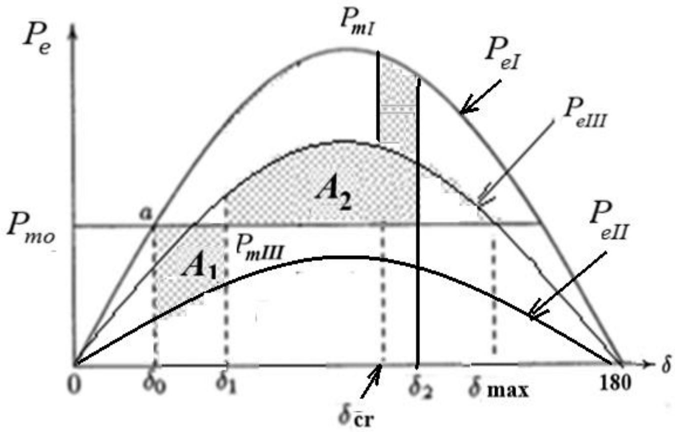
وستتحسن فرصة أن تعمل المنظومة بشكل مستقر . والشكل 8-23 يوضح هذه الحالة

في هذه الحالة ستكون زاوية إزالة العطل الحرجة

$$\delta_2 = \delta_{max} = \pi - \sin^{-1}\left(\frac{P_m}{P_{mI}}\right)$$

وقاعدة المساحات المتساوية تعطي الآتي

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_i - P_{mII}.\sin \delta) d\delta$$

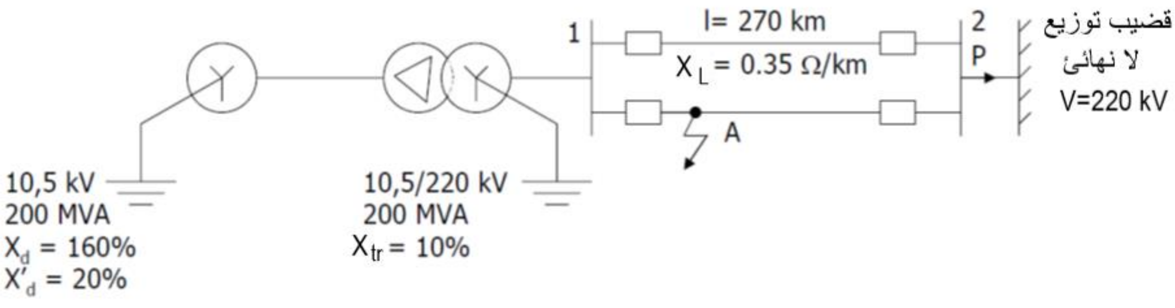


الشكل 8-23 .

$$= \int_{\delta_1}^{\delta_{rc}} (P_{mIII}.\sin\delta - P_m)d\delta + \int_{\delta_{rc}}^{\delta_{max}} (P_{mI}.\sin\delta - P_m)d\delta$$

مثال 8-4: أمثلة متنوعة

مولد تزامني يجهز قدرة MW176 بعامل قدرة 0.8 متأخر إلى قضيب توزيع لا نهائي كما موضح في الشكل 8-24. الآن حدث عطل قصر دائرة ثلاثة أطوار عند النقطة A على أحد الخطين بالقرب من مكان المولد . وسيلة الحماية للخط تم تنظيمها بحيث أن قاطعي الدائرة الموجودين عند طرف الإرسال وطرف الإستلام للخط يفصلان في اللحظة نفسها عندما تكون زاوية القدرة $\delta_1 = 50°$. وعند الزاوية التي تكون فيها زاوية القدرة $\delta_2 = 85°$ تم اشتغال قاطع دائرة ذاتي الغلق ذي سرعة عالية ليعيد ربط الخط مرة ثانية لكنه فشل بحيث أن قاطعي حماية الخط فصلا مرة ثانية في اللحظة نفسها عندما أصبحت زاوية القدرة $\delta_3 = 120°$. جد فيما إذا كانت المنظومة مستقرة أم لا . إهمل جميع المفاقيد فيها.



الشكل 8 -24.

الحل : باستخدام نظام نسبة الوحدة يمكن حل هذا المثال بسهولة كالآتي:

نختار قيم الأساس $S_b = 200\ MVA$ و $V_b = 220\ kV$ وهذا يعطينا الممانعة الأساس

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{220^2}{200} = 242\Omega$$

من هذه القيم الأساس نجد

$$X_L = \frac{240 \times 0.35}{242} = 0.390\, p.u.$$

القدرة بنسبة الوحدة

$$P = \frac{176\ MW}{200\ MW} = 0.880\ \ p.u.$$

$$I = \frac{P}{V\ \cos\emptyset} \qquad (V = 1.0\ \angle 0°)$$

$$= \frac{0.880}{1.0 \times 0.8} = 1.10\ \angle -36.87°$$

القوة الدافعة الكهربائية للمولد في الحالة العابرة

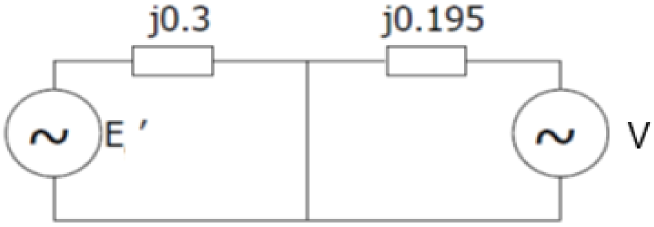
$$E' = V + j\left(X_d' + X_{tr} + \frac{X_L}{2}\right) \times I$$

$$= 1.0\angle 0° + j\left(0.2 + 0.10 + \frac{0.39}{2}\right) \times 1.1\angle -36.87° = 1.396\angle 18.18°$$

- قبل حدوث العطل تكون القدرة المنتقلة

$$P_1 = \frac{|V|.|E|}{\sum X_1}.\sin\delta = \frac{1.0 \times 1.396}{0.2 + 0.1 + 0.195}\sin\delta = 2.820\,\sin\delta$$

- خلال العطل تصبح الدائرة المكافئة كما في الشكل8-25 الآتي



الشكل 8-25 .

في هذه الحالة سوف لا يكون هناك انتقال قدرة ، أي أن $P_2 = 0$.

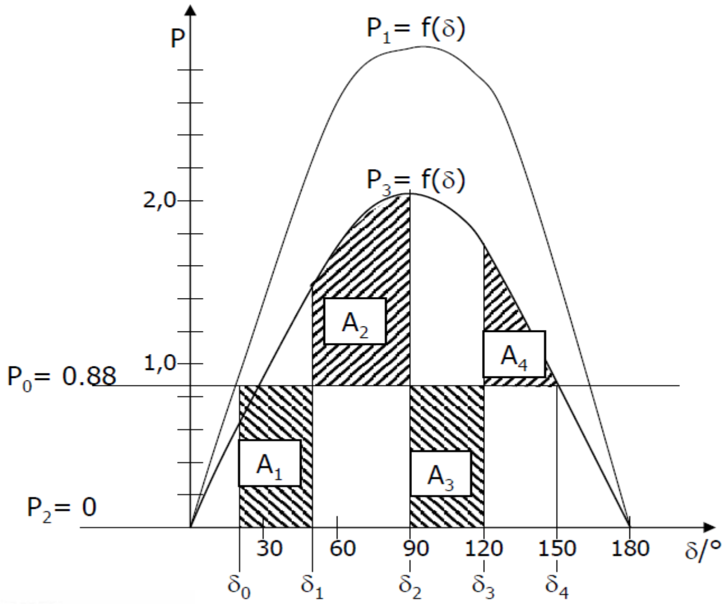
- عندما يتم فصل الخط المتعرض للعطل تكون القدرة المنتقلة

$$P_3 = \frac{|V|.|E|}{\sum X_3}.\sin\delta = \frac{1.0\times 1.396}{0.2+0.1+0.39}\sin\delta = 2.023\ \sin\delta$$

ويوضح الشكل 8-26 تطبيق قاعدة المساحات المتساوية لحل هذا المثال. في هذا الشكل مجموع مساحات التسارع :

$$A_1 + A_3 = P_0(\delta_1 - \delta_0 + \delta_3 - \delta_2)$$

$$= 0.88(50° - 18.18° + 120° - 85°)\frac{\pi}{180°} = \underline{\underline{1.026}}$$



الشكل 8-26.

ومجموع مساحات التباطؤ :

$$A_2 + A_4 = P_{3\max}\int_{\delta_1}^{\delta_2}\sin\delta d\delta + P_{3\max}\int_{\delta_3}^{\delta_4}\sin\delta d\delta - P_0(\delta_2 - \delta_1 + \delta_4 - \delta_3)$$

$$= P_{3\max}(\cos\delta_1 - \cos\delta_2 + \cos\delta_3 - \cos\delta_4) - P_0(\delta_2 - \delta_1 + \delta_4 - \delta_3)$$

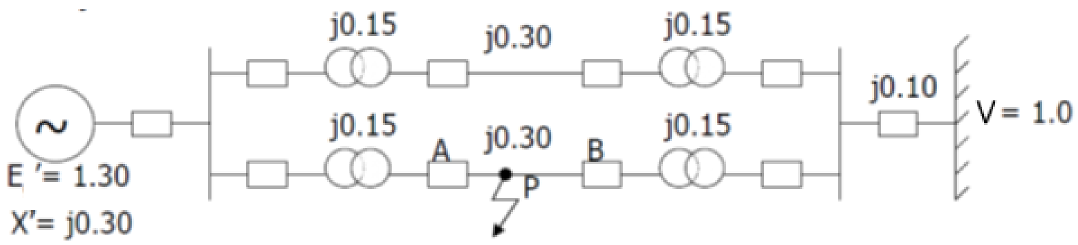
$$= 2.023(\cos 50° - \cos 85° + \cos 120° - \cos 71.82°) - 0.88(85° - 50° + 71.82° - 120°)\frac{\pi}{180°}$$

$$= \underline{\underline{0.869}}$$

بما أن $A_1 + A_3 > A_2 + A_4$ فهذا يعني أن المنظومة غير مستقرة .

مثال 8-5 :

مولد تزامني ربط إلى قضيب توزيع لا نهائي بواسطة خطين كما موضح في الشكل 8-27، فولتية قضيب التوزيع هي 1.0 بنسبة الوحدة . جميع قيم المفاعلات والفولتيات معطاة بنسبة الوحدة كما مشار اليها في الشكل المذكور .الآن حدث عطل قصر دائرة ثلاثة أطوار على احد الخطين عند النقطة P بحيث أن قاطعي الدائرة A و B فتحا في اللحظة نفسها وبقيا في حالة مفتوحة . القدرة التي كانت تجهز من قبل المولد قبل حدوث العطل هي 1.0 . بتطبيق قاعدة المساحات المتساوية جد قيمة الزاوية الحرجة δ_{cr} وهي تلك القيمة لزاوية القدرة التي تصلها قبل أن يتم فصل قواطع الدورة بدون حدوث اضطراب لاستقرارية المنظومة .



الشكل 8-27.

الحل :

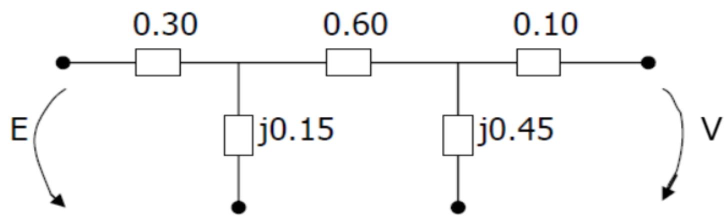
قدرة المولد في الحالة العابرة :

$$P = \frac{|V|.|E|}{X}.\sin\delta$$

(أ) قبل حدوث العطل

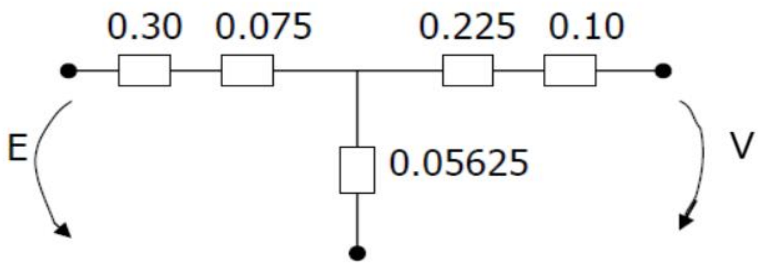
$$P_{eI} = \frac{1.0 \times 1.3}{0.3 + 0.3 + 0.10}\sin\delta = 1.86\ \sin\delta$$

(ب) خلال العطل تصبح الدائرة كما في الشكل 8-28.



الشكل 8-28.

وبتحويل هذه الدائرة من الربط المثلثي إلى الربط النجمي Y→Δ تنتج الدائرة كما في الشكل 8-29 :

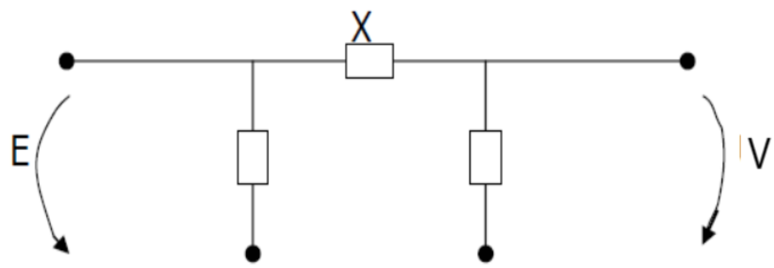


الشكل 8-29 .

وبتحويل هذه الدائرة من الشكل النجمي إلى الشكل الربط المثلثي تنتج الدائرة كما في الشكل:8 -30.

Y→Δ

⇓



الشكل 8-30.

حيث :

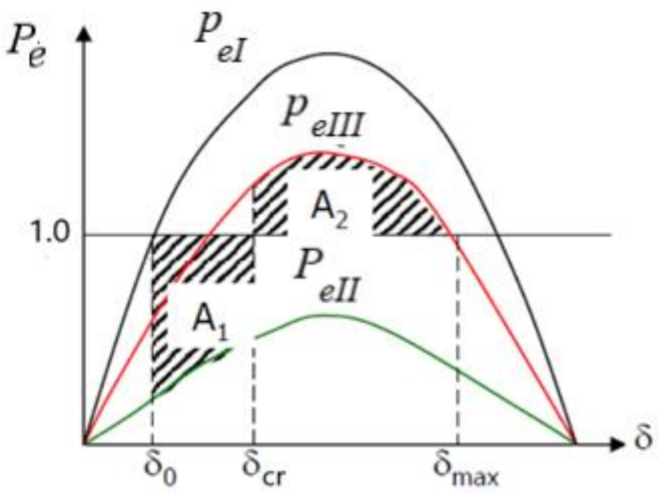
$$X = 0.375 + 0.325 + \frac{0.375 \times 0.315}{0.05625} = 2.867$$

$$P_{eII} = \frac{1.0 \times 1.3}{2.867} sin\,\delta = 0.453\, sin\,\delta$$

(جـ) بعد زوال العطل

$$P_{eIII} = \frac{1.0 \times 1.3}{0.3 + 0.6 + 0.10} sin\,\delta = 1.30\ \ sin\,\delta$$

الآن نرسم منحنيات القدرة – الزاوية كما في الشكل 8-31 :



الشكل 8-31.

نجد الآن الزاوية δ_o من القدرة P_{eI} :

$$1.86 \sin \delta_o = 1.0 \qquad \Rightarrow \qquad \delta_o 32.5° = 0.567$$

وكذلك نجد الزاوية δ_{max} من القدرة المنتقلة P_{eIII}:

$$1.30 \sin \delta_{max} = 1.0 \qquad \Rightarrow \qquad \delta_{max} = 129.7° = 2.264$$

وبموجب قاعدة المساحات المتساوية يجب أن تكون $A_2 \geq A_1$ ، والآن $A_1 = A_2$ عندما:

$$\int_{0.564}^{\delta_{cr}} (1 - 0{,}453 \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_{cr}}^{2.264} (1.3 \sin \delta - 1)\, d\delta$$

$$(\delta + 0.453\ \cos \delta) \Big|_{0.564}^{\delta_{cr}} = (-1.3\ \cos \delta - \delta) \Big|_{\delta_{cr}}^{2.264}$$

$$0847 \cos \delta_{cr} = 0.4845 \qquad \Rightarrow \qquad \therefore\ \delta_{cr} = 55.1°$$

الفصل التاسع 9 إستقرارية الفولتية وإستقرارية التردد

Voltage stability and Frequency stability

1-9 مقدمة

في العقود السابقة كانت منظومات القدرة و خطوط النقل في معظم دول العالم مصممة للعمل بوجود حد أو هامش استقرارية كبير ، أي لا توجد ضغوط على الشبكة ككل. لكن منذ العقود الأربعة الأخيرة أصبحت المنظومات تعمل تحت شروط أكثر تعقيداً من ذي قبل و ذلك لبروزعوامل عديدة ومتنوعة أدت الى ذلك منها مايمكن ذكره كأسباب رئيسة :

1-الضغوط البيئية على امتداد خطوط النقل.

2 –ازدياد الاستهلاك الكهربائي في بعض المناطق ذات الاحمال الكبيرة (إذ لا يمكن تركيب محطات بالقرب منها).

بسبب هذه الظروف المتعددة ، قد تتعرض المنظومة الكهربائية لإضطرابات تؤدي إلى انخفاض الفولتية انخفاضاً بطيئاً أو مفاجئاً أو انخفاضاً أو زيادة في التردد كما تم شرح ذلك في الفصل الثالث . وتجدر الإشارة إلى أن العديد من هذه الآضطرابات قد حدثت في كثير من الدول في أنحاء العالم، لذلك أصبح استقرار منظومات القدرة وبضمنها استقرار فولتياتها وترددها من أكبر اهتمامات مشغلوا أنظمة القدرة الكهربائية الحديثة.

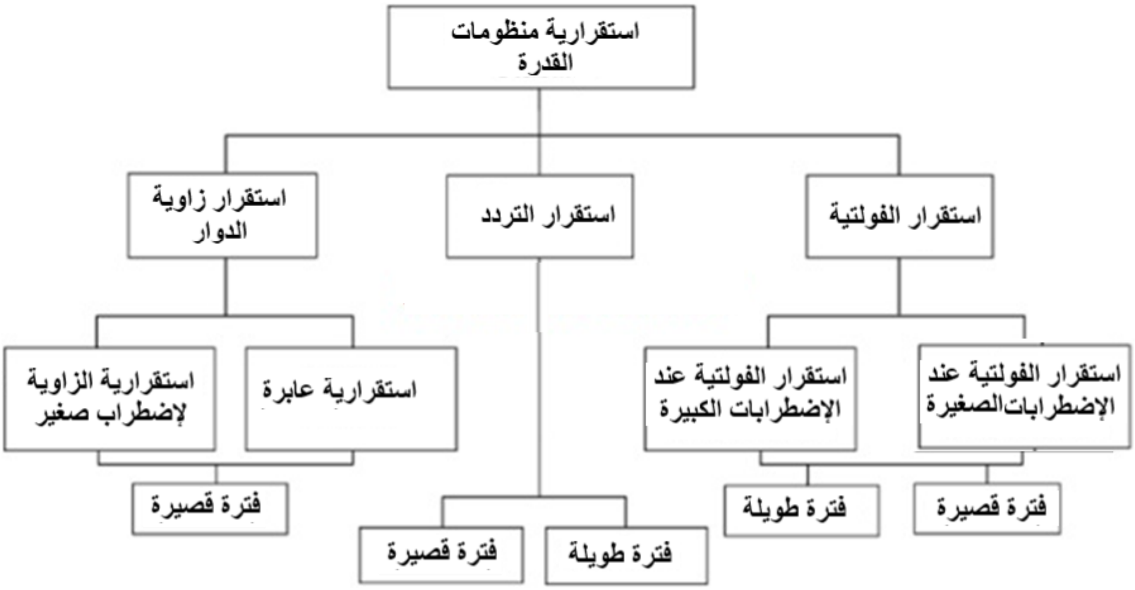
2-9 إستقرار الفولتية وإستقرار التردد

إلى جانب دراسات استقرارية زاوية الدوار وانواعها التي تمت بيانها في الفصول الماضية والتي كانت تعرف بوصفها قدرة منظومة القدرة على الحفاظ على التزامن بين المولدات عند شروط التشغيل الطبيعية بعد تعرضها للإضطراب فإن هناك أيضاً نوعين مهمين آخرين في دراسات إستقرارية المنظومة وهما :

1- استقرار الفولتية أو الجهد : ويعرف بوصفه قدرة منظومة القدرة على الحفاظ على فولتيات قضبان التوزيع عند حدود العمل الطبيعية المسموحة ضمن شروط عمل طبيعية بعد تعرضها للإضطراب.

ويدعى استقرار الفولتية أيضاً باستقرار الحمل و يصبح النظام غير مستقر عندما تهبط الفولتية بشكل غير متحكم به (عند خروج خط أو خروج مولد أو زيادة الحمل أو خلل بالتوليد)، و العامل الأهم في عدم الاستقرار هو عدم مقدرة المنظومة على تلبية القدرة المتفاعلة Q المطلوبة. وتعد القدرة المتفاعلة العامل الأهم في استقرار الفولتية وذلك لكون أن مفاقيد القدرة المتفاعلة هي أكبر من مفاقيد القدرة الفعالة P ، لذا يتطلب تعويض هذه القدرة عند مراكز الأحمال.

2 - استقرار التردد : وهو قدرة منظومة القدرة على الحفاظ على التردد عند حدود العمل الطبيعية المسموحة في شروط العمل الطبيعية بعد تعرضها للإضطراب. وقد تم مناقشة الحدود الطبيعية للتردد في الفصل الثاني ، الفقرة 2-4. ويبين المخطط التالي تصنيف فئات استقرارية منظومات القدرة في ضوء خلاصة هذه المفاهيم.



3-9 استقرار الفولتية

بصورة عامة تدخل منظومة القدرة في حالة عدم استقرار الفولتية في حالات ثلاث:

- زيادة الطلب على الحمل .
- تغيرات في الظروف التشغيلية للمنظومة التي تسبب زيادة مطردة (تصاعدية) في الهبوط بالفولتية غير مسيطر عليه.
- عدم مقدرة المنظومة على تلبية الحاجة إلى تدفق القدرة الفعالة P والقدرة المتفاعلة Q خلال المفاعلات الحثية المترافقة مع شبكات النقل.

إن معيار استقرار الفولتية يكمن في أنه عند ظروف تشغيل معينة فمقدار الفولتية لأي قضيب توزيع ضمن المنظومة يزداد كلما ازداد حقن القدرة المتفاعلة في هذا القضيب نفسه. وتكون المنظومة غير مستقرة من ناحية الفولتية إذا إنخفض مقدار الفولتية V في واحد من قضبان التوزيع في الأقل عند زيادة حقن القدرة المتفاعلة Q في القضيب نفسه.

إن الزيادة المطردة في هبوط الفولتية عند قضبان التوزيع يمكن أن تكون مرافقة للزيادة في زاوية الدوار عندما تكون هذه الزاوية مائلة للخروج عن التزامن. مثال على ذلك فقدان التزامن التدريجي للمكائن عند إقتراب زويا الدوار لها من الزاوية 180 درجة والتي ينتج عن هذه الحالة فولتيات منخفضة جداً في النقاط الوسطية للشبكة. ومما تجد الإشارة إليه هو أن عدم إستقرار الفولتية هو في الأساس ظاهرة موقعية (محلية) لكن تبعاتها وآثارها قد تمتد إلى مناطق كثيرة وتكون واسعة الإنتشار .

بالنسبة إلى موضوع استقرارية منظومات القدرة بصورة عامة فإن استقرارية الفولتية يمكن أن نضع تصنيفها تبعاً لعاملين كما في الجدول 9-1:

1- مقياس الزمن.

2-القوة المؤثرة على عدم الإستقرار.

ويقصد بالقوة المؤثرة على عدم الاستقرار : تأثير التوليد، وتأثير الحمل ، ويقسم مقياس الزمن إلى فترة قصيرة و فترة طويلة.

الجدول9-1.

مقياس الزمن	تأثير المولدات	تأثير الحمل
فترة قصيرة	استقرار زاوية الدوار 1-استقرارية الحالة المستقرة 2-حالة عابرة - إشارة صغيرة	استقرارية الفولتية لفترة زمنية قصيرة
فترة طويلة	استقرار التردد	استقرارية الفولتية لفترة زمنية طويلة

كما مر ذكره سلفاً فإن استقرار الدوار يقسم إلى إشارة صغيرة و حالة عابرة ، إذ تمثل الإشارة الصغيرة تعرض المنظومة لإضطراب صغير، أما الحالة العابرة فتمثل تعرض المنظومة لإضطراب كبير. وتحدد زاوية الدوارالحركة الديناميكية الكهروميكانيكية لمنظومة القدرة، ويدعى مقياس الزمن بالفترة

القصيرة لأن النموذج الديناميكي يدوم فقط لبضع ثواني حيث تكمن مشكلة الاستقرار في تأثير الحمل الذي ممكن أن يكون تأثيره لفترة قصيرة أو طويلة تبعا لمميزات وخواص الحمل. ويتأثر استقرار الفولتية ذو الفترة القصيرة بوجود عناصر أو أجهزة في المنظومة مثل :

- المحركات الحثية
- أجهزة الإثارة المغناطيسية للمولدات التزامنية
- اجهزة التحكم والسيطرة
- معوضات القدرة الفعالة الساكنةStatic var compensation

إن الفترة الزمنية لإستقرار الفولتية ذو الفترة القصيرة هي الفترة الزمنية نفسها لإستقرار زاوية الدوار، إذ يتشابهان من حيث تمثيل المشكلة وتحليلها، و في بعض الأحيان يكون التمييز بين إستقرارية زاوية الدوار واستقرارية الفولتية ذات الزمن القصير من الصعوبة بمكان.

1-3-9 تصنيف استقرار الفولتية

لأغراض دراسة وتحليل إستقرارية الفولتية لمنظومات القدرة من المفيد أن تصنف صيغ استقرار الفولتية إلى نمطين رئيسيين تبعا لطبيعة فترة الاضطراب:

1- استقرارالفولتية للإضطرابات الكبيرة Large-disturbance voltage stability .
2- استقرارالفولتية للإضطرابات الكبيرة Small-disturbance voltage stability .

تتضمن دراسات استقرارية الفولتية قابلية منظومة القدرة على السيطرة والتحكم على الفولتيات ضمن الشبكة بعد حصول اضطرابات كبيرة مثل حدوث أعطال في المنظومة أو فقدان وحدات التوليد أو الحالات الطارئة التي تحدث في الدوائر الكهربائية . ويتم تحديد هذه القابلية بواسطة خواص ومميزات الحمل الكهربائي وكذلك الأفعال التبادلية بين أجهزة السيطرة وأجهزة الحماية كليهما.

إن تحديد استقرارية المنظومة للإضطرابات الكبيرة تتطلب دراسة وفحص أداء المنظومة الحركي (الديناميكي) غير الخطي خلال فترة زمنية كافية للتمكن من استيضاح التفاعلات الديناميكية بين الأجهزة الخاصة بمآخذ تغيير الفولتية وأجهزة تحديد تيار الإثارة المغناطيسية للمولدات. هذه الفترة الزمنية للدراسة قد تمتد من بضع ثوان إلى عشرات الدقائق ؛ لذلك فان التمثيل الديناميكي للفترة الطويلة يكون مطلوباً في مثل هذه التحليلات والدراسات Long-term dynamic simulation studies . ويمكن القول بأن معيار أو مقياس إستقرارية الفولتية للأضطرابات الكبيرة هو أنه بعد حصول إضطراب معين متبوعاً

باشتغال منظومات السيطرة والتحكم فإن الفولتيات عند جميع قضبان التوزيع يجب أن تصل إلى مستويات مقبولة بعد استقرار المنظومة .

على الجانب الآخر فإن إستقرارية المنظومة للإضطرابات الصغيرة تعني قابلية المنظومة على السيطرة على الفولتيات التي تتبع حدوث اضطراب صغير مثل التغيرات الجزئية في الحمل . هذا النوع من الإستقرارية يتحدد بخواص ومميزات الحمل نفسه وكذلك نوعية السيطرة سواء كانت سيطرة مستمرة Continuous control أو سيطرة متقطعة Discrete control في لحظة معينة من الزمن. وهذا المفهوم أو المعيار مفيداً في تحديد كيفية استجابة الفولتية خلال فترة قصيرة معلومة من الزمن للتغيرات الصغيرة في المنظومة.

إن العمليات الأساسية التي تساهم في استقرارية الفولتية للإضطرابات الصغيرة هي في الأساس ذات طبيعة مستقرة . لذلك فإن التحليلات الساكنة (الستاتيكية) يمكن أن يكون استخدامها ذو تأثير فعال لإيجاد هوامش وحدود للإستقرارية Stability margins وكذلك تحديد العوامل المؤثرة على الإستقرارية ودراسة أوسع لظروف المنظومة وعدد أكبر لها من السيناريوهات بعد حدوث الإضطرابات.

إن الفترة الزمنية لإستقرار الفولتية ذو الفترة القصيرة هي الفترة الزمنية نفسها لإستقرار زاوية الدوار، إذ يتشابهان من حيث تمثيل المشكلة وتحليلها، و في بعض الأحيان يكون التمييز بين إستقرارية زاوية الدوار واستقرارية الفولتية ذات الزمن القصير من الصعوبة بمكان.

2-3-9 إنهيار الفولتية Voltage collapse

إن معضلة إنهيار الفولتية Voltage collapse تكون أكثر تعقيداً من معضلة عدم استقرار الفولتية التي إن حدثت تنتج عنها أحداث متتابعة تؤدي إلى إنخفاض في الفولتية في أجزاء مهمة من منظومة القدرة. وتعد المحافظة على مجال مناسب من حدود عدم استقرار الفولتية هماً كبير، لأن كثيراً من المنظومات تحمل شبكات نقلها على أكبر استطاعة ممكنة من دون زيادة استطاعة النقل.

عندما تتعرض المنظومة الكهربائية لإضطراب ديناميكي، فإن نقطة التشغيل للمنظومة تتغير تغيراً تدريجيا لتصل إلى نقطة انهيار و بفترة زمنية تتراوح من دقائق إلى ساعات. وكلما كان إطار الزمن طويل للمشكلة سمح للمشغل اليدوي على التدخل فضلاً عن التحكم الآلي.

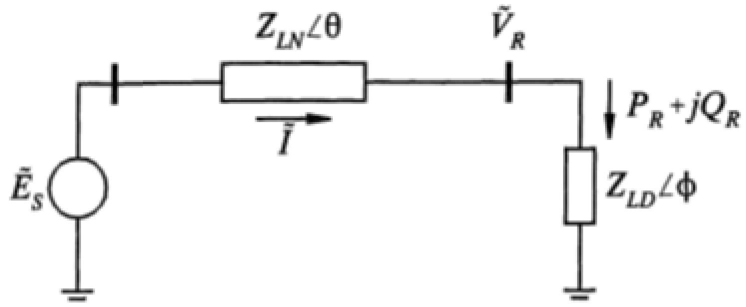
تحدث مشاكل استقرار الفولتية في المنظومات التي ينحرف فيها مستوى الفولتية تحت المستوى المقبول، حيث أنه عند القرب من نقطة انهيار الفولتية تكون المنظومة حساسة جداً لتغيرات الحمل لذا فإن معرفة مستوى الفولتية عند نقطة التشغيل الآنية قد لا يكون كافياً في التنبؤ بحدوث مشاكل عدم استقرار.

إن معظم أحداث انهيار الفولتية تكون مرتبطة بالمنظومات المحملة بحمولة زائدة، إذ إن كميات كبيرة من القدرة الفعالة و القدرة المتفاعلة تنقل بفولتيات عالية جداً عبر خطوط النقل، وتكون مصادر

القدرة المتفاعلة غير مناسبة للحفاظ على فولتيات ثابتة في نهايات قضبان التجميع. وفي بعض حالات منحنيات الفولتية لا يظهر أي شذوذ مسبق في انهيار الفولتيات بسبب تغيرات الحمل. ومن الممكن أن لا يلاحظ المشغل أية إشارة تحذير قبل حدوث تغيرات مهمة ومفاجئة للفولتية تحدث نتيجة لاشتغال أجهزة الحماية مسببة هي الأخرى في إنهيار المنظومة .

4-9 طرق عدم استقرار الفولتية في الشبكات

قد يحدث عدم استقرار في الفولتية بطرق مختلفة ، فمثال بسيط على أبسط صوره يمكن أن يتوضح في الدائرة الكهربائية المبينة في الشكل 9-1 التي تحتوي على مصدر للفولتية ثابت E يغذي حمل Z_{LD} عن طريق ممانعة Z_{LN} . إن هذه الدائرة في الأساس تمثل تغذية شعاعية بسيطة لحمل كهربائي أو منطقة حمل مخدومة بواسطة منظومة كبيرة خلال خط نقل مفرد. وتسمى أيضاً في بعض المراجع منظومة بسيطة ذات قضبان توزيع إثنين Simple 2-bus system .



الشكل 9-1 منظومة شعاعية بسيطة لبيان ظاهرة استقرارية الفولتية

في هذه الدائرة تكون معادلة التيار

$$\tilde{I} = \frac{\widetilde{E_S}}{\widetilde{Z_{LN}} + \widetilde{Z_{LD}}}$$

حيث $\widetilde{Z_{LD}} = Z_{LD}\angle\emptyset$, $\widetilde{Z_{LN}} = Z_{LN}\angle\theta$, $\tilde{I}$

هي كميات طورية ،ويكون مقدار التيار

$$I = \frac{E_s}{\sqrt{(Z_{LN}\cos\theta + Z_{LD}\cos\emptyset)^2 + (Z_{LN}\sin\theta + Z_{LD}\sin\emptyset)^2}}$$

$$I = \frac{1}{\sqrt{K}}\frac{E_s}{Z_{LN}} \qquad (9.1)$$

حيث

$$K = 1 + \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}}\right)\cos(\theta - \emptyset)$$

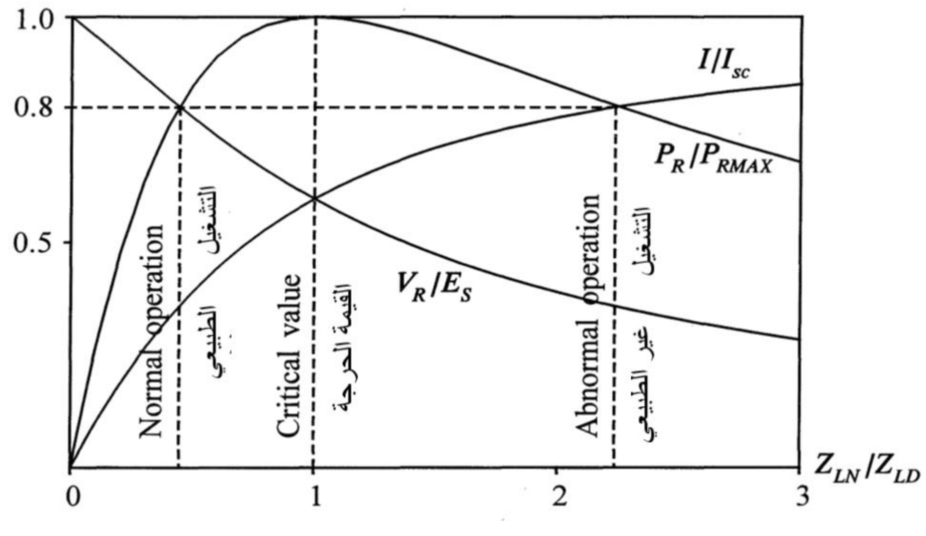
وتكون فولتية طرف الإستلام

$$V_R = Z_{LD}.I = \frac{Z_{LD}}{K}\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}}E_s \qquad (9.2)$$

وتكون القدرة المجهزة للحمل P_R :

$$P_R = V_R I\cos\emptyset = \frac{Z_{LD}}{K}\left(\frac{E_s}{Z_{LN}}\right)^2 E_s \qquad (9.3)$$

هذه القدرة المجهزة للحمل تزداد كلما قلت Z_{LD} بربط أحمال إضافية وتكون هذه الزيادة سريعة في البداية ثم تبدء بالتباطؤ إلى أن تصل إلى قيمة عظمى بعد ذلك تبدء مرة ثانية بالتباطؤ. هذا يعني أن هناك قدرة محدودة ترسل خلال ممانعة من المصدر إلى الحمل. ويبين الشكل 9-2 تغير التيار I والفولتية V_R و القدرة P_R مع قيمة نسبة الممانعتين Z_{LN}/Z_{LD} .



الشكل 9-2 فولتية وتيار وقدرة طرف الإستلام كدالة للطلب على الحمل للمنظومة المبينة في الشكل 9-1.

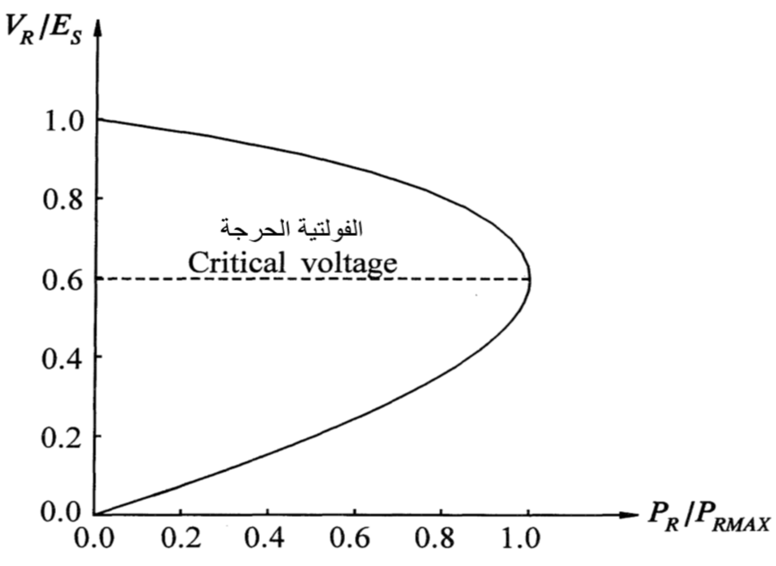
($I_{sc}=E_S/Z_{LN}$; cosϕ=0.95 lag; tanθ=10.0)

في هذا الشكل ،تكون القدرة المنتقلة بقيمتها العظمى لما يكون الهبوط بالفولتية في خط النقل يساوي مقدارفولتية الطرف V_R وهذا يحدث لما تكون النسبة $\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} = 1$. وكلما قلت قيمة Z_{LD} تدريجياً سوف تقل قيمة التيار I وتقل قيمة الفولتية V_R . وفي البدايةً عند القيم العالية لممانعة الحمل Z_{LD} فإن الزيادة في التيار I تكون طاغية على الإنخفاض في الفولتية V_R ، لذا تكون الزيادة في القدرة P_R سريعة مع الإنخفاض في الممانعة Z_{LD} . وإذا قلَت قيمة Z_{LD} بحيث أصبحت تساوي قيمة Z_{LN} فسيكون تأثير

الإنخفاض في التيار I أكبر بقليل من الإنخفاض في الفولتية V_R ؛ أما إذا أصبحت Z_{LD} أقل من Z_{LN} فسيكون الإنخفاض في V_R هو المسيطر على الزيادة في التيار ويكون محصلة هذا التأثير هو انخفاض في القدرة P_R .

إن ظروف التشغيل الحرجة المناظرة لأعظم قيمة للقدرة المنتقلة تمثل حدود التشغيل الجيد . وإذا كان هنلك طلب على الحمل متزايد فان التحكم بواسطة تغيير الحمل نفسه ستكون عملية تؤدي إلى عدم الإستقرار، هذا يعني بأن تقليل ممانعة الحمل سيقلل من القدرة. وفيما إذا إنخفضت الفولتية بصورة متزايدة واصبحت المنظومة غير مستقرة فان هذا يعتمد على خواص الحمل نفسه. بعبارة أخرى إذا كان الحمل يمتلك خواص ممانعة ثابتة ستاتيكية فإن المنظومة تكون مستقرة نوعاً ما عند مستويات من الفولتية والقدرة أقل من القيم المرغوب بها . وإذا كان الحمل يمتلك خواص القدرة الثابتة فان المنظومة ستكون غير مستقرة من خلال الإنهيارات المتتالية بفولتية قضبان التوزيع. ولخواص أخرى غير المذكورة سلفاً فان الفولتية يتم ايجادها من جمع خواص خط النقل مع الحمل نفسه. وإذا كان الحمل مغذى بواسطة محولات فولتية تحتوي على مآخذ التغيير الخاصة بانخفاض الفولتية (ULTC) فان فعل المأخذ سوف يرفع فولتية الحمل وهذا بدوره يخفض من قيمة V_R أكثر مما يؤدي إنخفاض متزايد في الفولتية وهو بمعنى آخر صيغة بحته وبسيطة من صيغ عدم استقرار الفولتية.

من وجهة نظر استقرارية الفولتية فإن العلاقة بين القدرة P_R بين الفولتية V_R هي علاقة مهمة في تقييم استقرار الفولتية . هذه الأهمية مبينة في الشكل 9-3 للمنظومة البسيطة تحت الدراسة عندما يكون عامل القدرة 0.95 متأخر.



الشكل 9-3 العلاقة بين القدرة والفولتية للمنظومة المبينة في الشكل 9-1 .

من المعادلتين (9.2) و (9.3) نلاحظ أن عامل القدرة له تأثير ملحوظ على خواص العلاقة بين القدرة والفولتية للمنظومة. وهذا متوقع لكون أن الهبوط بالفولتية علي خط النقل هو دالة للقدرة الفعالة والقدرة المتفاعاة المنتقلة عبر الخط. لذلك فإن استقرار الفولتية هو في الحقيقة يعتمد أساساً على العلاقة بين القدرتين P و Q وبين الفولتية V . لذلك فالمنحنيات P-V و V-Q يمكن منها إيجاد حدود التحميل للحالة المستقرة للمنظومة وبالتالي فهما يكونان مفيدان جداً في تحديد استقرارية الفولتية كما سنأتي على شرح هذه العلاقة وفائدتها ضمن أنواع طرق ايجاد استقرارية الفولتية في الفقرة التالية.

9-5 طرق تحليل استقرارية الفولتية

توجد في المراجع المعتمدة طرق مختلفة لإستبيان إستقرارية الفولتية ؛ لكن الطرق التقليدية يمكن تصنيفها بصورة واسعة إلى الأنواع التالية :

1. طريقة فحص منحنى العلاقة بين القدرة الفعالة والفولتية P-V curve method .
2. طريقة فحص منحنى العلاقة بين الفولتية والقدرة المتفاعلة V-Q curve method .
3. الطرق المبنية على دراسات تدفق القدرة Power flow بايجاد الإنفرادية Singularity لمصفوفة جاكوبين Jacobian matrix عند نقطة انهيار الفولتية .
4. طريقة استمرارية تدفق القدرة .

في هذا الكتاب سوف نقوم بشرح الطريقة الأولى والثانية فقط لكون ان الطرق الأخرى هي خارج المضمار.

9-5-1 طريقة فحص منحنى العلاقة بين القدرة الفعالة والفولتية

هذه الطريقة هي إحدى الطرق الشائعة الإستخدام في تحليل استقرارية الفولتية ، حيث تعطي مقدار الهامش المتاح لحد القدرة الفعالة قبل الوصول إلى نقطة عدم استقرارية الفولتية . وفي المنظومات الشعاعية يتم مراقبة الفولتية الحرجة لقضيب توزيع عندما يحدث تغير في استهلاك القدرة الفعالة. أما في الشبكات الكبيرة الواسعة فان القدرة الفعالة P تؤخذ بوصفها الحمل الفعال الكلي في منطقة الحمل ، وتؤخذ الفولتية V للفولتية الحرجة لقضيب التوزيع أو قضيب التوزيع النموذجي الذي يتم أخذه لتمثيل المنظومة.

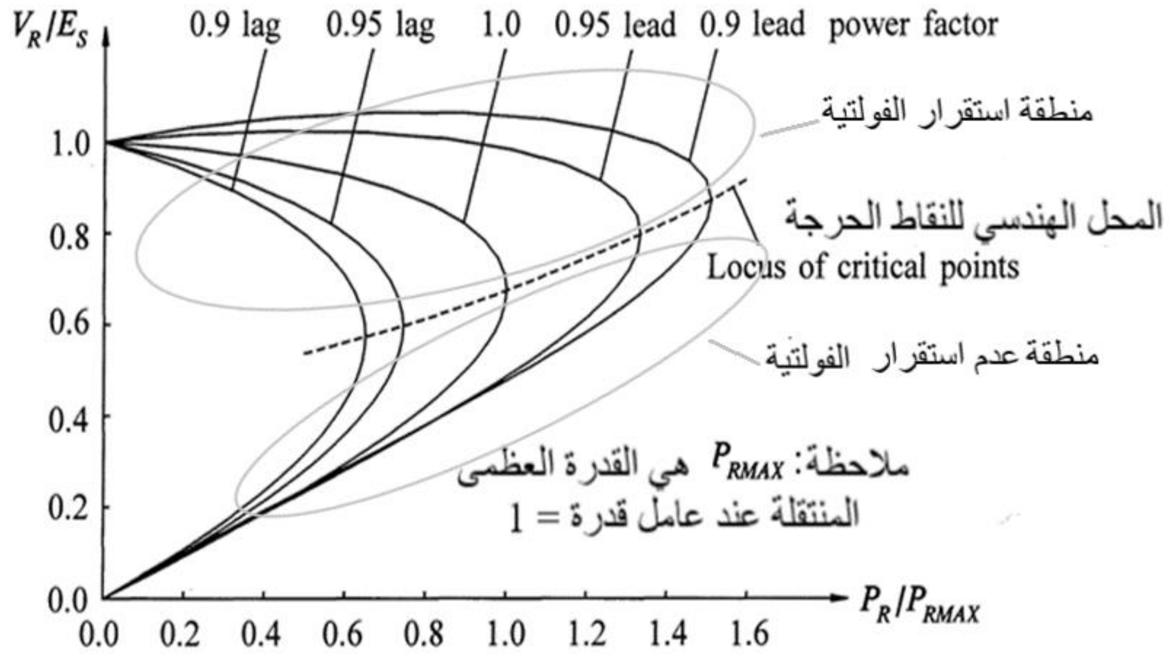
أما بالنسبة إلى المنظومة البسيطة ذات القضيبين المعطاة في الشكل 9-1 فيتم رسم العلاقة بين P_R و V_R لقيم مختلفة لعامل القدرة للحصول على مجموعة منحنيات تمثل العلاقة بين القدرة الفعالة والفولتية كما مبينة في الشكل 9-4 ويتم تحديد المحل الهندسي لنقاط التشغيل الحرجة كما موضح بالخط المتقطع في الشكل. من الطبيعي أن يخمن القارئ أن نقاط التشغيل التي تقع فى أعلى النقاط الحرجة تمثل حالات الإشتغال الجيد . وإذا حدث انخفاض مفاجئ بعامل القدرة (ازدياد مفاجئ في القدرة المتفاعلة Q) فسوف

يتغير وضع المنظومة من حالة الإستقرار إلى وضع يؤدي بها إلى حالة عدم الإستقرار المتمثلة بالقسم السفلي من منحنى العلاقة بين P_R وV_R.

مما مر في أعلاه وجدنا إن منحنيات P-V مفيدة في التحليلات الحسابية لإستقرار الفولتية. ولما كانت هذه المنحنيات هي منحنيات خاصة بمنظومة شعاعية بسيطة كالتي في الشكل 9-1 إلا أن هذا النموذج البسيط يمكن استخدامه لتمثيل منظومة كبيرة تحتوي على مصادر فولتية متعددة وأحمال وخطوط نقل في الشبكة. وخلاصة القول يمكن أن نكتب :

إذا كانت $\frac{dP}{dV} > 0$ تكون المنظومة مستقرة

إذا كانت $\frac{dP}{dV} < 0$ تكون المنظومةغير مستقرة



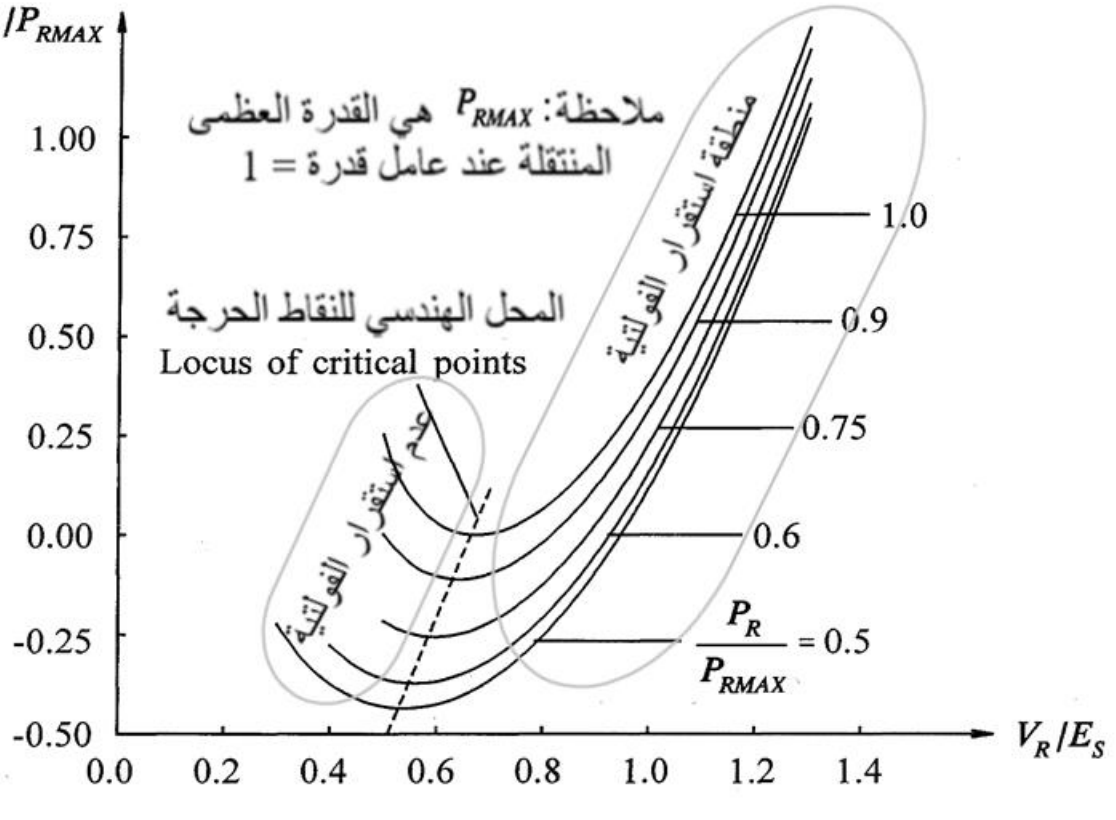
الشكل 9-4 خواص المنظومة التي في الشكل9-1 لقيم مختلفة من عامل القدرة للحمل.

9-5-2 طريقة فحص منحنى العلاقة بين الفولتية V والقدرة المتفاعلة Q

إن تاثير خواص القدرة المتفاعلة للإجهزة والمعدات التي تكون في طرف الإستلام للمنظومة التي في الشكل9-1 (أجهزة الحمل وأجهزة التعويض الكهربائية) مبينة بصورة واضحة في الشكل 9-5 الذي يبن مجموعة منحنيات الخاصة بالمنظومة التي في الشكل 9-1 كل منحني من هذه المنحنيات يعطي العلاقة بين

V_R و Q_R لقيمة ثابتة من P_R. وتكون المنظومة مستقرة إذا كانت المشتقة $\frac{dQ_R}{dV_R}$ موجبة . وحد استقرارية الفولتية (نقطة التشغيل الحرجة) يحصل عندما تكون هذه المشتقة مساوية للصفر. لذا فإن جزء مجموعة منحنيات Q-V الذي يكون على يمين المجموعة الدنيا يمثل التشغيل المستقر ويكون الجزء على اليمين يمثل التشغيل غير المستقر.

إن التفسير أعلاه لظاهرة لإستقرارية الفولتية هو أساسي يساعد على تصنيف وفهم الأوجه المختلفة لاستقرارية منظومة القدرة. والتحليلات التي وردت في هذه الفقرة هي محدودة لمنظومة بسيطة شعاعية ذات قضيبي توزيع ، أما بالنسبة للمنظومات الكبيرة العملية المعقدة فان هناك عوامل كثيرة ومتشعبة تساهم في انهيار المنظومة نتيجة عدم استقرار الفولتية ومن هذه العومل نذكر الآتي:



الشكل 9-5 خواص V_R-Q_R للمنظومة التي في الشكل 9-1 لقيم مختلفة للنسبة P_R/P_{Rmax} .

- قوة شبكة النقل في المنظومة
- مستوى إنتقال القدرة الفعالة
- مميزات وخصائص الحمل
- حدود استطاعة المولد التزامني لتوليد القدرة المتفاعلة
- مميزات وخواص أجهزة تعويض القدرة المتفاعلة

وفي بعض الحالات تتعقد ظاهرة عدم استقرارالفولتية هذه أكثر بسبب عدم التنسيق الجيد بين أجهزة السيطرة وأجهزة الحماية الكثيرة الموجودة في المنظومة.

3-5-9 إستقرارية الفترة المتوسطة وإستقرارية الفترة الطويلة

إن مصطلحا إستقرارية الفترة الطويلة وإستقرارية الفترة المتوسطة هما مصطلحان حديثان في دراسات إستقرارية منظومات القدرة حيث تم إدخالهما لحاجة التعامل مع المسائل المتعلقة بالإستجابة الحركية أو الديناميكية لمنظومات القدرة عند تعرضها لإضطرابات قاسية وشديدة . هذه الإضطرابات القاسية ينتج عنها إنحرافات كبيرة في الفولتية والتردد وجريان القدرة في الشبكة عموماً. هذه الإنحرافات تحتاج إلى أجهزة التحكم والسيطرة وأجهزة الحماية التي يكون عملها بطئً نسبياً والتي لم يتم نمذجتها وتمثيلها وتفعيل دورها في دراسات الإستقرارية العابرة.

إن الزمن المميزللعمليات التي تتم في منظومة القدرة وكذلك تحفيز تشغيل المعدات والأجهزة الناجمة عن حدوث الإنحرافات الكبيرة في الفولتية والتردد يتراوح هذا الزمن من بضع ثواني (استجابة أجهزة السيطة والحماية للملدات التزامنية) إلى عدة دقائق (استجابة الأجهزة المعدات الخاصة بتجهيز الطاقة للمدور الأساسي ومنظمات فولتية الحمل).

في تحليلات الإستقرارية للفترة الطويلة يتم عموماً الفرض بأن تذبذب قدرة التزامن قد تم إخمادها، لهذا سيكون تردد المنظومة منتظماً . والتركيز هنا يتم على الفعاليات البطيئة ذات الفترة الطويلة التي تصاحب إضطراب المنظومة على نطاق كبير الذي يؤدي إلى عدم توافق كبير ومستديم بين التوليد والإستهلاك للقدرة الفعالة والقدرة المتفاعلة كليهما. هذه الفعاليات تشمل :

- ديناميكية معدات التسخين لوحدات التوليد الحرارية
- التحكم التلقائي في التوليد
- التحكم والسيطرة والحماية لمنظومات التوليد والنقل في محطات القدرة
- التشبع المغناطيسي الذي يحصل في حديد المحولات
- تأثير التغير في التردد عن القيم القياسية على الأحمال وعلى الشبكة.

أما دراسات الإستقرارية للفترة المتوسطة فإن الإستجابات للفترة المتوسطة هي الإنتقال من الإستجابات للفترة القصيرة إلى اللإستجابات للفترة الطويلة. ويتم التركيزفي دراسات الفترة المتوسطة على تذبذب قدرة التزامن بين المكائن التزامنية شاملة تأثير بعض الفعاليت والظواهر البطيئة أو كذلك احتمال شمول الإنحراف الكبير بالفولتية والتردد.

في أدناه الفترات الزمنية القياسية لدراسة استقرارية منظومات القدرة :

- الفترة القصيرة أو الفترة العابرة : من 0 إلى 10 ثواني
- الفترة المتوسطة : من 10 ثواني إلى بضع دقائق
- الفترة الطويلة : من بضع دقائق إلى عشرات الدقائق

ومما تجدر الإشارة اليه هو أن التفريق بين استقرارية الفترة المتوسطة واستقرارية الفترة الطويلة يرتكز أساساً على الظاهرة تحت الدراسة والتحليل وعلى تمثيل المنظومة المستخدم ماصة ما يختص بالزوال السرع للإضطراب (الحالة العابرة السريعة) والتذبذبات التي تحدث بين المكائن التزامنية .

وبصورة عامة فان دراسات إستقرارية الفترة الطويلة وإستقرارية الفترة القصيرة ترتبط بعدم كفاية استجابات المعدات وكذلك ضعف التنسيق بين معدات التحكم والسيطرة ومعدات الحماية أو عدم كفاية إحتياطي القدرة الفعالة والقدرة المتفاعلة.

إن استقرارية الفترة الطويلة تأخذ بعين الإعتبار إستجابة المنظومة للإضطرابات العظيمة التي تنطوي على حوادث غير متوقعة خارج المعايير الطبيعية لتصميم المنظومة . هذا يؤدي إلى تجزأة متتابعة لمنظومة القدرة وتشكيل عدة مناطق تسمى بالجزر حيث تحتوي هذه الجزر على مولدات تبقى في حالة تزامن مع بعضها البعض. وتكون الإستقرارية في هذه الحالة جواباً على فيما إذا وصلت كل منطقة لحالة اشتغال متوازن ومستقر بصورة مقبولة بدون فقدان الحد الأدنى من الحمل. هذا يمكن ايجاده بتخمين الإستجابة الكلية للمنطقة واعتبارها كدليل لمعدل قيمة التردد بدلاً من إيجاد الحركة النسبية للمكائن التزامنية. وفي الحالات المتطرفة جداً فان حماية المنظومة ووحدات التوليد قد تعقد الحالة الوخيمة المتجهة نحو الإنهيار وبالتالي تؤدي إلى انهيار المنطقة كلها أو جزء منها.

كذلك يمكن استخدام دراسات الإستقرارية للفترة المتوسطة والطويلة في تحليل مسائل استقرار الفولتية التي تتطلب تمثيل تأثير بعض المعدات المتخصصة في منظومة القدرة مآخذ تغيير الفولتية في المحولات وحماية دائرة الإثارة المغناطيسية للمولدات وكذلك تحديد القدرة المتفاعلة والأحمال الحرارة ، في هذه الحالات فان التذبذب بين المكائن يكون دراسته غير مهم.

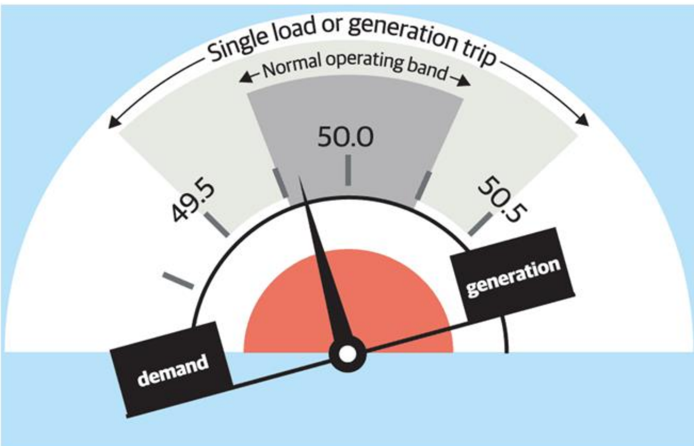
6-9 إستقرارية التردد

لقد تم تعريف استقرارية التردد في الفقرة 9-2 بوصفها " قدرة منظومة القدرة على الحفاظ على التردد عند حدود العمل الطبيعية المسموحة في شروط العمل الطبيعية بعد تعرضها للإضطراب".

بصورة عامة يكون عدم استقرار التردد في منظومات القدرة ناتج عن عدم التوازن الملحوظ بين ين التوليد والإستهلاك ، ويقصد بالإستهلاك هنا هو الحمل الكهربائي على المنظومة وسنستعمل في هذا السياق كلمة الحمل بدلاً من الإستهلاك كونها أشمل من الناحية الهندسية. وإضافة إلى عدم التوازن بين التوليد والحمل فقد يترافق معه الأمور الثلاثة الآتية :

- عدم وجود تنسيق جيد بين أجهزة الحماية وأجهزة السيطرة والتحكم
- عدم وجود توليد احتياطي كاف في المنظومة
- عدم كفاية استجابة المعدات والأجهزة

إن عدم التوازن بين التوليد والحمل يتسبب بانحراف في تردد المنظومة عن قيمة التردد المطلوب فاذا كان تردد المطلوب هو 50 هرتز مثلاً فان زيادة الحمل أو زيادة الطلب على استهلاك الطاقة الكهربائية سوف يؤدي إلى إنحراف في التردد كما هو موضح في الشكل 9-6 سواء في الزيادة أو النقصان. ويتم الحفاظ على استقرارية الشبكة الكهربائية بموازنة القدرة المتولدة مع الإستهلاك من خلال المراقبة والتحكم المستمر للشبكة. هذا يعني إن ازدياد الطلب على القدرة مثلا يقابله انخفاض في تردد الشبكة ما لم يقابله زيادة للقدرة المتولدة مما يعيد قيمة التردد إلى قيمة الاستقرار.



الشكل 9-6 تأثير التوازن بين التوليد والطلب (الحمل) على التردد.

إن التغير في التردد عن القيمة المطلوبة سيؤدي إلى تغير في التردد الزاوي ω للمنظومة لكون أن العلاقة بينهما هي $\omega = 2\pi f$. ولما كان تردد المنظومة f والتردد الزاوي ω كليهما كميات شاملة يدخل تأثيرهما في كثير من الأجهزة والمعدات في المنظومة فإن عدم التوازن بين التوليد والحمل يؤثربالطبع على اشتغال المكائن التزامنية لمنظومة القدرة حيث أن أي تغيير في التردد الزاوي سيؤدي بالنتيجة إلى

تغير في العزم الكهرومغناطيسي و بالتالي إلى عدم التوازن بين هذا العزم والعزم الميكانيكي الداخل إلى للمولدات لكون أن العلاقة بين تغير القدرة المتولدة والتغير في التردد الزاوي هي

$$\Delta\omega=\Delta P/\ 2H\ sys$$

حيث ΔP هو التغير في القدرة الفعالة، أما $H\ sys$ فهو القصور الذاتي الذي يحسب بكونه مجموع القصور الذاتي لجميع المولدات التوربينية في منظومة القدرة . ويشار هنا إلى القصور الذاتي للمولد التوربيني بكونه مقاومة التغير في سرعة الدوار. وفي منظومات القدرة الكبيرة الحاوية على مولدات تزامنية كثيرة العدد والمربوطة اليها فإن القصور الذاتي للكتل الكبيرة يكون كبير جداً ، لذلك فإن التغير في التردد الزاوي يحتاج إلى تغير كبير للقدرة الفعالة . على أية حال ، فإن الاسلوب الذي يتغير فيه التردد الزاوي يعتمد على حجم منظومة القدرة وشدة الاضطراب. أما منظومات القدرة المعزولة وغير المرتبطة مع منظومات أخرى فتكون ميالة أكثر إلى فصل المولدات الكبيرة فيها عند تعرضها للإضطراب.

بصورة عامة تكون منظومات القدرة مصممة لتحتوي على منظومات ثانوية للسيطرة والتحكم سواء كانت تلقائية أو يدوية للتحكم في التردد. ويكون هذا التحكم على ثلاثة مستويات:

- التحكم الأساسي (الأولي) ويكون تلقائياً (ذاتياً) Automatic
- التحكم الثانوي ويكون تلقائياً أيضاً
- التحكم المساعد ويكون يدوياً ومنتشراً ويكون مسيطراً عليه باشراف مباشر من مراكز السيطرة والتحكم .

إن التحكم الأساسي يصمم للعمل على استقرار التردد في أول ثانية زمنية لحدوث الإضطراب ، أما التحكم الثانوي فيصمم للعمل على لإحداث التوازن بين التوليد والحمل تلقائياً بجعل تردد المنظومة ضمن الحدود المطلوبة . وأما التحكم المساعد الثالث فواجبه استبدال أو أن يحل محل الاحتياط الثانوي للقدرة للحفاظ على احتياطي قدرة فعال وذاتي في المنظومة لأجل مجابهة أي عدم توازن في القدرة غير متعمد وكذلك مجابهة الإنحرافات في التردد نفسه.

في الشبكات الوطنية للمعظم بلدان العالم تقضي الأنظمة القياسية والكودات بوجوب وجود احتياطي قدرة مناسب ومتاح في كل الأوقات لتنظيم القدرة عند ارتفاها أو عند انخفاضها لأجل مجابهة الفصل غير المتعمد لمحطات القدرة الكبيرة أو فصل مراكز الأحمال الكبيرة. إضافة لذلك فإن منظومات القدرة المجاورة يمكن أن تساهم في استعادة التوازن بين التوليد والحمل . على أية حال فإن الخطر قد يكون آتياً من الأعطال التي قد تؤدي إلى التأثير على كمال الشبكة حيث أن انفصال أحد خطوط النقل أو أحد المحولات نتيجة الأعطال يؤدي بالتأكيد إلى إزدياد التحميل على فروع أخرى في الشبكة وبالتالي إلى ضعف في سعة واستطاعة منظومة النقل لمسالك الشبكة الذي يؤدي على المدى البعيد في عدم توازن موقعي شديد بين التوليد والحمل.

يؤدي الإنحراف الكبير في التردد إلى إرتباك شديد في منظومة القدرة ؛ إذ يؤثر على جريان القدرة وتغيرات كبيرة في الفولتية بالإضافة إلى التأثير الملحوظ على قيم متغيرات المنظومة نفسها . إن التغيير في مقدار الفولتية الذي قد تكون نسبته أعلى من التغيير في التردد يؤثر بشكل ملحوظ على التوازن بين التوليد والحمل حيث أن الفولتية الزائدة العالية تؤدي إلى فصل وحدات التوليد الذي يتسبب عن ضعف في التصميم أو فقدان التنسيق لمرحلات الإثارة المغناطيسية أو مرحلات مراقبة نسبة الفولتية / التردد . وفي المنظومات التي تتعرض إلى زيادة في التحميل فإن انخفاض مقدار الفولتية قد يتسبب في تحفيز عمل غير مرغوب فيه لمرحلات الممانعية (مرحلات المسافية). على هذا الأساس فانه يمكن أن يقال أن عدم استقرار التردد هي ظاهرة غير مستقلة بحد ذاتها بأي شكل من الأشكال.

مما تجدر الإشارة إليه هو ان فعاليات التصحيح للعمليات والتحكم والسيطرة وكذلك تأثر عمل أجهزة الحماية لم تؤخذ بعين الإعتبار في دراسة الإستقرارية العابرة التقليدية . هذه العمليات قد تكون بطيئة جداً مثل ديناميكية عمل السخانات أو أية حالات تحفيز لظروف المنظومة المتطرفة الكبير في التردد قد يكون بسبب عدم مقدرة المولدات التزامنية على المحافظة على التوازن بين التوليد والحمل أو استرجاعه. وعدم الإستقرار هذا قد يحدث بشكل تأرجح مستديم في التردد مما يؤدي إلى فصل وحدات التوليد عن العمل أو فصل الأحمال أو كليهما. لذلك يجب اتخاذ إجراءات زمنية مثالية لغرض التقليل من كمية الأحمال التي تخرج عن الخدمة إلى الحد الأدنى.

بالنسبة إلى وحدات التوليد التي تشتغل بطاقة المياه فان اشتغالها قد لا يتأثر بالإنخفاض الكبير بالفولتية عند حدوثه حتي وصوله لنسبة 10% . إلا أن المحطات الحرارية تكون حساسة جداً للإنخفاض بقيمة الفولتية حتى إلى نسبة 5% وذلك بسبب أجهزتها التي تعمل المحركات الكهربائية مثل مضخات المياه التي تغذي المراجل البخارية وأجهزة سحق وهرس وتغذية الفحم للمحارق وكذلك ساحبات الهواء التي تكون حساسة للتردد. هذا يعني أن انخفاض بسيط يكون له تأثير كبير على الأجهزة المساعدة هذه وذلك لإنخفاض القدرة المجهزة لها ويقلل من الطاقة الداخلة للتوربين وبالتالي يقلل من الطاقة الخارجة من المولد التي بدورها تنتج انخفاض إضافي في تردد المنظومة كفعل تتابعي. إضافة لذلك فانه يحدث تلف في التوربين من الناحية الميكانيكية عند اشتغاله بترد منخفض.

في منظومات القدرة الكبيرة المترابطة فيما بينها فان عدم التوازن الكبير في القدرة قد يسبب ضعف في التقارن بين المولدات بحيث يؤدي ذلك إلى أن مجموعة من المولدات تعمل بترددات مختلفة مؤدية إلى تجزأة الشبكة إلى مناطق تسمى بالجزر Islands . في هذه الحالات فالسؤال هو هل يتمكن التردد في هذه الجزر من الوصول إلى حالة الإسقرار؟. هذا سوف يعتمد على وجود التنسيق بين أجهزة التحكم والسيطرة

وأجهزة الحماية . ولغرض منع الإنهيار في هذه الجزر تفعيل مرحلات الحماية ضد انخفاض التردد وفصل قسم من الأحمال لغرض المحافظة على التوازن بين التوليد والحمل.

الزمن المميز للعمليات التي تجري خلال الإنحراف بقيم التردد يتراوح بين بضع ثوانٍ ، وهذا الزمن الذي يمثل اشتغال واستجابة أجهزة الحماية والسيطرة للمولدات واجهزة الحماية التي تعمل على فصل الأحمال ، إلى عدة دقائق التى تمثل زمن رد فعل المدور الأساسي أو رد فعل منظمات الفولتية . على أية حال فان المميزات الزمنية العاملة على استقرار التردد تعتمد على حجم منظومة القدرة حيث أنه إما أن يكون خاضع لنظرية الفترة الزمنية المتوسطة أو الفترة الزمنية الطويلة .

ان الفترة الزمنية المتوسطة لعدم استقرار التردد والإنهيار يمكن أن يلاحظ في الجزر المنفصلة التي تنشأ بعد عملية تجزأة الشبكة والتي لا يكون فيها مصادر توليد كافية ومعدات سيطرة جيدة ، بينما في معضلات استقرارية التردد للفترة الطويلة والتي يمكن أن تؤدي إلى إنهيار المنظومة يمكن أن تحدث عندما يحدث خلل في عمل كل من أجهزة التحكم الخاصة بالسرعة الزائدة للتوربين البخاري أو في أجهزة السيطرة والحماية للسخانات والمفاعلات في المحطات النووية.

6-9 -1 التحكم في التردد

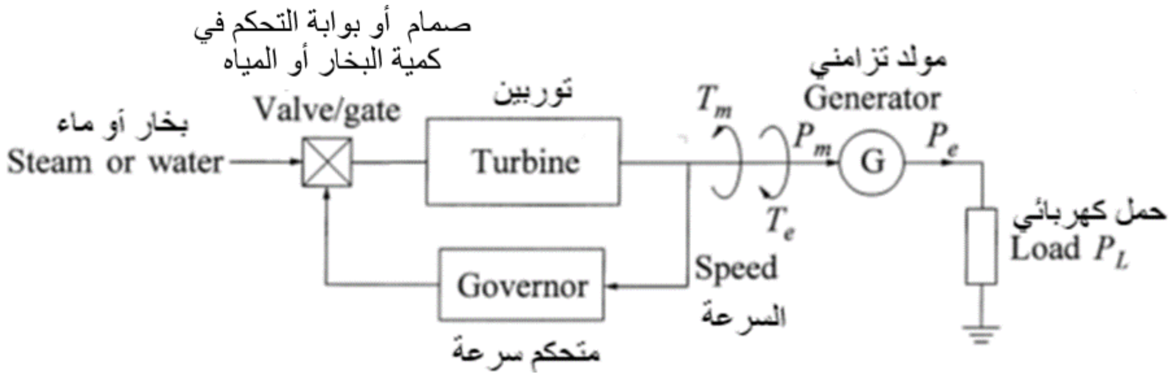
من شروط الإشتغال الجيد لمنظومة القدرة هو أن يكون التردد فيها ثابتاً تقريباً . والتحكم النسبي في التردد يجعل سرعة المحركات الحثية والمحركات التزامنية ثابتة. والثبات في سرعة المحركات التي تستخدم في المعدات والأجهزة المساعدة والخاصة بتغذية المياه والوقود لوحدات التوليد والأمور الخرى هو من الأهمية الكبيرة جداً للحصول على أداء جيد لهذه الوحدات التوليدية . إن الإنخفاض الملحوض في تردد الشبكة يمكن أن يؤدي إلى جريان تيار مغنطة عال في المحركات الحثيى والمحولات بصورة عامة . إضافة إلى ذلك فان الإستخدام الواسع لساعات التوقيت الكهربائية واستخدام التردد في المزامنة والتوقيت لكثير من الفعاليات ضمن عمل المنظومة ؛ لذلك فمن الضروري جداً أن يتم تنظيم التردد في جميع هذه المنظومات الثانوية التي تعمل على التواقت الزمني.

التردد هو العامل المشترك لعموم المنظومة فان التغير في الطلب على القدرة الفعالة في أية نقطة ضمن المنظومة سينعكس على المنظومة كلها بسبب التغير في التردد. ولما كانت هناك مولدات كثيرة تعمل على تجهيز القدرة للمنظومة فيجب في هذه الحالة أن تتضمن معدات وأجهزة تخصص للتعامل مع التغير في الطلب للمولدات. من هذه هو جهاز التحكم بالسرعة Speed governor الذي يتم تجهيزه لكل وحدة توليد وظيفته الأساسية هي التحكم والسيطرة على السرعة .

9-6-2 أساسيات عمل المتحكم بالسرعة

يمكن توضيح الفكرة الأساسية للتحكم بالسرعة بالإشارة إلى الشكل 9-7. فعندما يحصل تغير في الحمل فان هذا ينعكس لحظياً بالتغير في العزم الكهربائي الخارج T_e للمولد. هذا سيسبب عدم توازن بين العزم الكهربائي والعزم الميكانيكي الداخل T_m الذي بدوره يؤدي إلى حدوث تغير في السرعة . والشكل 9-8 يبين دالة الإنتقال التي تمثل العلاقة بين سرعة الدوار كدالة للعزم الميكانيكي والعزم الكهربائي. ولغرض دراسة العلاقة بين التردد والحمل فانه من المفضل التعبير عن العلاقات التي في الشكل 9-7 بدلالة القدرة الميكانيكية والقدرة الكهربائية بدلاً من العزم . على هذا الأساس فان العلاقة بين القدرة والعزم هي :

$$P = \omega_r T \qquad (9.4)$$



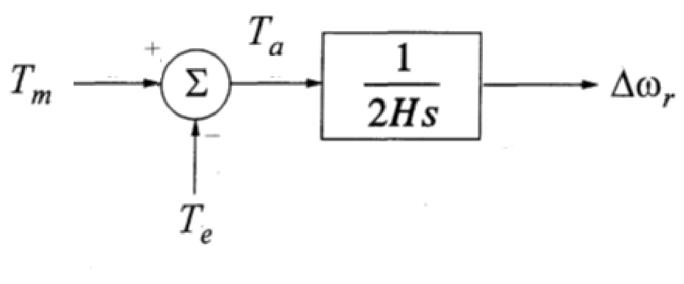
الشكل 9-7 مولد يغذي حملاً مستقلاً.

حيث أن :

T_m = العزم الميكانيكي $\qquad$ P_m = القدرة الميكانيكية $\qquad$ P_L = قدرة الحمل

T_e= العزم الكهربائي $\qquad$ P_e = القدرة الكهربائية

ألآن دعنا نتأمل حدوث إنحراف صغير (يشار اليه بالحرف اللاتيني Δ) عن القيم الأولية (يشار اليها بالرقم صفر 0) فيمكننا كتابة المعادلات الآتية :



s = معامل لابلاس
T_m = العزم الميكانيكي
T_e = العزم الكهربائي
T_a = عزم التسارع (Tacc)
H = ثابت القصور الذاتي
$\Delta\omega_r$ = الانحراف في سرعة الدوار

الشكل 9-8 دالة الإنتقال التي تربط بين السرعة والعزوم.

$$P = P_0 + \Delta P \qquad (9.5)$$

$$T = T_0 + \Delta T \qquad (9.6)$$

$$\omega_r = \omega_0 + \Delta\omega_r \qquad (9.7)$$

من المعادلة (9.4) :

$$P_0 + \Delta P = (\omega_0 + \Delta\omega_r)(T_0 + \Delta T)$$

من المعادلة أعلاه فان العلاقة بين قيم الإنحراف يمكن كتابتها كما يأتي بإهمال الحدود ذات الأسس العالية

$$\Delta P = \omega_0 \Delta T + T_0 \Delta\omega_r \qquad (9.8)$$

عليه فان

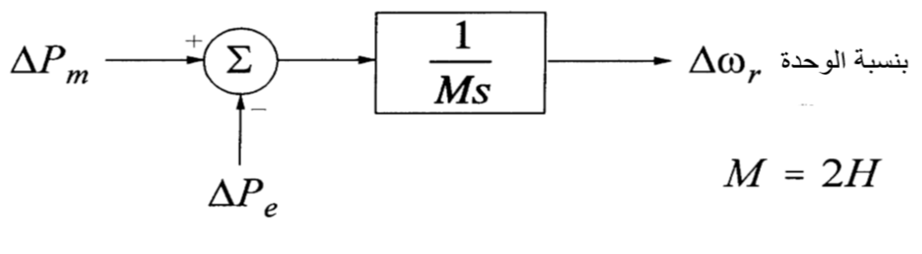
$$\Delta P_m - \Delta P_e = \omega_0(\Delta T_m - \Delta T_e) + (T_{m0} - T_{e0})\Delta\omega_r \qquad (9.9)$$

ولما كان العزم الميكانيكي والعزم الكهربائي متساويان في حالة الإستقرار وكذلك إذا تم أخذ ω_0 تساوي 1 بنسبة الوحدة ينتج

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \Delta T_m - \Delta T_e \qquad (9.10)$$

الآن يمكن التعبير عن القيم التي في الشكل 9-8 بدلالة القيم ΔP_m و ΔP_e كما في الشكل 9-9 .

من الشكل 9-9 يتبين أن التغير في السرعة ضمن حدود اهتمامنا فان القدرة الميكانيكية الخارجة من التوربين البخاري أو المائي تكون لها علاقة وطيدة بوضعية الصمام الخاص بتجهيز البخار في حالة المحطات الحرارية أو وضع البوابة الخاصة بتنظيم عملية إدخال المياه في حالة المحطات المائية وليس لها علاقة بالتردد اساساً. وتجدر الإشارة إلى أن متحكم السرعة للتوربينات له زمن تأخير يتراوح بين 3 إلى 5 ثواني.



الشكل 9-9 دالة الإنتقال التي تربط السرعة بالقدرة.

7-9 خطورة إشتغال التوربينات عند التردد المنخفض

هناك مشكلتان أساسيتان تضهران عند اشتغال منظومة القدرة في تردد منخفض .هاتان المشكلتان مرتبطتان بالمحطات الحرارية بصورة خاصة.

- المشكلة الأولى تتعلق بالإجهاد التقليدي على ريش التوربين البخاري الطويلة التي تعمل بالضغط المنخفض. لقد وجد بأن اشتغال التوربين البخاري عند تردد منخفض أقل من 48.5 هرتز غير ممكن على الإطلاق وذلك بسبب تأثير الإجهاد المتسبب عن الذبذبات والذي يتزايد تأثيره مع الزمن بصورة متراكمة ويجب في هذه الحالة إعادة قيم التردد إلى وضعها الطبيعي باسرع وقت ممكن.
- أما المشكلة الثانية فتتعلق باشتغال الأجهزة والمعدات المساعدة خاصة التي تعمل بالمحركات الحثية ، حيث أن اشتغال هذه المعدات والأجهزة بتردد من 47 هرتز فان قدرة المحطة التوليدية قد تقل بصورة كبيرة بسبب انخفاض سرعة مضخات تغذية المراجل وكذلك تأثر سرعة المراوح لدافعات الهواء اللازم للإحتراق. وفي المحطات التي تعمل بالطاقة النووية قد يحصل تسخين مفرط للمفاعلات النووية بسبب تقليل جريان مواد التبريد بسبب الإنخفاض في التردد. لذلك من الأهمية القصوى بمكان أن يتم تجهيز هذه المحطات بحماية مناسبة ضد انخفاض جريان مواد التبريد أو مرحلات حماية ضد الإنخفاض في التردد. وقد يتم فصل وحدات التوليد عن العمل في المنظومة .

إضافة لتجنب المشاكل المذكورة في أعلاه وتبعاتها فانه من الضروري جداً العمل على استعادة قيمة التردد الطبيعي باسرع وقت. كذلك يمكن استعادة استقرارية التردد بفصل أحمال مختارة من المنظومة تبعاً لقيمة الإنخفاض في التردد وبموجب القواعد التالية:

- فصل 10% من الحمل الكلي عند انخفاض التردد إلى 49.5 هرتز .
- فصل 15% من الحمل الكلي عند انخفاض التردد إلى 48.8 هرتز .
- فصل 20% من الحمل الكلي عند انخفاض التردد إلى 48.0 هرتز .

الفصل 10 تأثير محطات الطاقة المتجددة على استقرارية منظومات القدرة

1-10 مقدمة

يمر قطاع الطاقة في الوقت الحاضر بمرحلة التحول السريع للتكامل مع مصادر الطاقة المتجددة مثل محطات توليد الطاقة من الرياح ومحطات توليد الطاقة من الألواح الكهروضوئية PV وغيرها في شبكات النقل والتوزيع كليهما. وخلال العقدين الأخيرين (2000-2020) تم ربط 1200 GW من مصادر الطاقة المتجددة مع الشبكات الكبرى في معظم البلدان حول العالم بسبب الضغوط المتزايدة لتخفيض الإنبعاثات المضرة والملوثة للبيئة الناتجة عن توليد الطاقة الكهربائية من الوقود الأحفوري (الفحم والنفط والغاز) وكذلك لبدء نضوب مصادر هذا النوع من الوقود في العالم .

وتختلف محطات الطاقة المتجددة عن المحطات التقليدية (الغازية – الحرارية وغيرها) بعدم قدرتها على المناورة مع تغير الأحمال بالإضافة إلى عدم إمكانية التحكم بكمية الطاقة المتولدة كونها تعتمد في التوليد على مصادر الطاقة التي لايمكن التحكم بها كما هو الحال في يوم غائم لا يسمح بوصول كمية الإشعاع الشمسي المطلوبة إلى الألواح الشمسية أو إنخفاض في سرعة هبوب الرياح وبالتالي تنخفض قيمة الطاقة المتولدة. وفي حال كان الطلب على الطاقة أكبر من قيمة الطاقة المتولدة، فإن ذلك سيؤدي إلى انخفاض في تردد الشبكة وعدم استقرارها، وإذا استمر ذلك لفترة من الزمن فسوف يسبب انقطاعات في التغذية عن أجزاء من الشبكة الكهربائية.

2-10 تأثير إدخال مصادر الطاقة المتجددة على بنية الشبكات الكبرى

في الوقت الحاضر تجري أعمال كثيرة حول العالم لادخال مستويات عالية من مصادر الطاقة المتجددة الأنية حيث تجاوز مستوى الإدخال في بعض بلدان العالم أكثر من 100% . ويعرف مستوى الإدخال موصوفاً على أساس حاجة المنطقة أو البلد من القدرة نسبة إلى القدرة الفائضة عن حاجته والتي تصدر منه إلى المناطق أو البلاد المجاورة خلال اشتغال المنظومة . لذلك فان بعض البلدان تتبنى أساليب محافظة أكثر في ربط وتشغيل وتصدير مصادر الطاقة المتجددة (التي تعد توليد غير تزامني) آخذت بعين الإعتبار خصوصية حدود الإستقرارية في جدولة تصدير الطاقة . **مصادر الطاقة المتجددة هذه أحدثت تغييرات كبيرة في هيكلية وبنية شبكات القدرة وعمليات التشغيل والسيطرة والتحكم .**

كما تم التطرق إليه سابقاً أن استقرارية منظومة القدرة تعد من الظواهر الحرجة في اشتغال المنظومة ويتوجب على مشغلي المنظومة من خلال منظومات الإشراف والسيطرة وجمع البيانات (SCADA system) مراقبة فولتيات المنظومة والتردد وزاوية الدوار للمكائن التزامنية واستطاعة المنظومة على نقل القدرة بين مناطق معينة ضمن الشبكة. وبسبب ادخال وربط مصادر الطاقة المتجددة في الشبكات الكبرى فقد تم ايجاد وفرض استخدام رموز وارقام قياسية مختلفة ومتقدمة لكي يستخدمها مشغلوا المنظومات للمحافظة على استقرارية الشبكات .

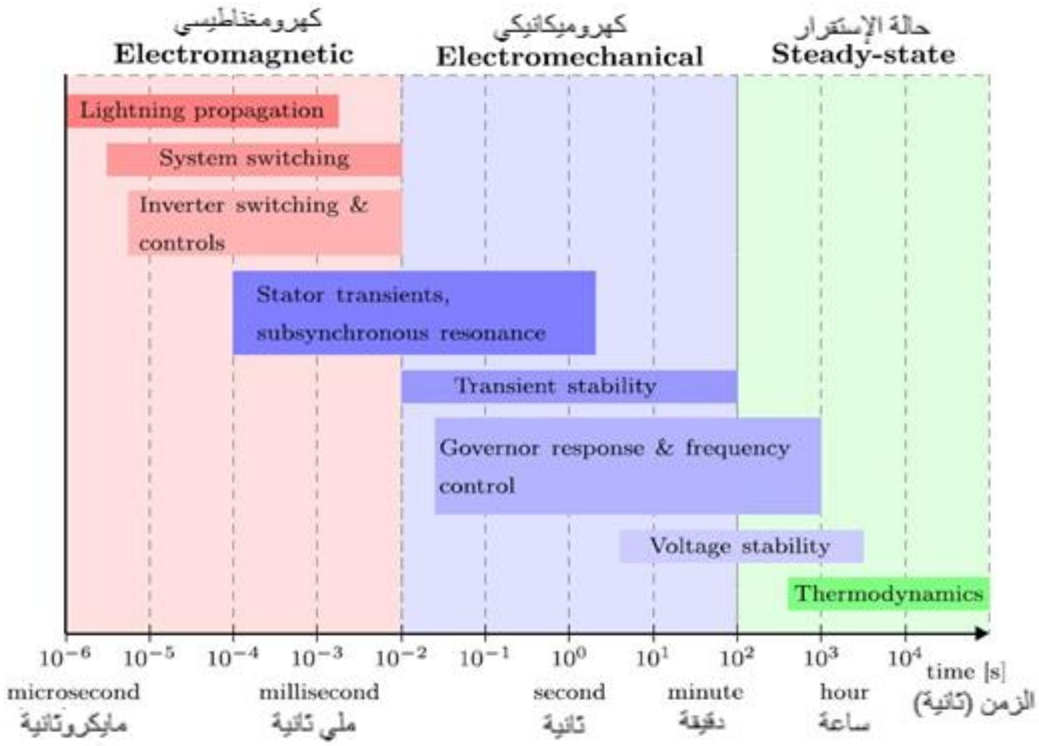
في هذا الفصل سوف نستعرض بصورة مفصلة مشاكل استقرارية منظومات القدرة والشبكات الكبرى التي ترتبط وتتكامل معها مصادر الطاقة المتجددة . كذلك بيان التأثير الحرج لأوجه الإستقرارية المختلفة على منظومات القدرة الذي يسببها اشتغال مصادر الطاقة المتجددة سوية مع الشبكات الكبرى مع تسليط الضوء على التوجهات المستقبلية في معالجة مشاكل استقرارية الشبكات هذه حيث أن مشاكل الإستقرارية في هذه الشبكات تنشأ بصورة رئيسية بسبب الأمور التالية:

- الإنخفاض بالقصور الذاتي التزامني
- التقليل في احتياطي القدرة المتفاعلة
- الإنخفاض في قوة قصر الدائرة عند حدوث الأعطال
- مقدرة أجهزة التحويل التي تربط بين الشبكة الكبرى ومصادر الطاقة المتجددة التي تحتوي معظمها على أجهزة تحويل تيار متناوب إلى تيار مستمر (مقومات Rectifiers) وأجهزة تحويل تيار مستمر إلى تيار متناوب (مغيرات Inverters) والتي تستخدم معظمها العناصر الألكترونية ذات القدرة العالية Power Electronics Elements .

إن تقليل أو تخفيض القصور الذاتي الذي يطلق عليه في مسائل الإستقرارية بالقصور الذاتي التزامني Synchronizing inertia يمكن أن يؤثر على استقرارية زاوية الدوار واستقرارية التردد ، بينما يسبب كل من تقليل قوة قصر الدائرة وتقليل احتياطي القدرة المتفاعلة مشاكل في استقرارية الفولتية وكذلك في استقرارية زاوية الدوار لشبكات القدرة الكبرى.

وحيث أن توليد الطاقة المتجددة كان معروف منذ 100 عام عندما استخدمت المولدات التزامنية التي تعمل بطاقة المياه في السدود وخزانات المياه في بلدان كثيرة حول العالم . كذلك تم استخدام المولدات الحثية Induction generators التي تعمل بطاقة الرياح قبل أكثر من ثلاثين سنة . وبسبب التقدم الذي حصل في صناعة الخلاية الشمسية (PV) وتكنولوجيا ألكترونيات القدرة منذ ستينيات القرن الماضي فقد تسارع دمج المولدات التي تعمل بطاقة الرياح ومصادر الطاقة الشمسية في الشبكات الكبرى التي كان لها الأثر

في توسع وابدال منظومات القدرة التقليدية . ولما كانت مصادر التوليد هذه ترتبط بالمنظومات بواسطة الأجهزة الألكترونية ذات القدرة العالية PEC فانها تكون أساساً مختلفة عن مصادر التوليد التقليدية التي يكون اساسها مولدات تزامنية تقليدية حيث أثرت مصادر توليد الطاقة المتجددة في استقرارية منظومة القدرة باشكال متعددة ، ولتوضيح هذا التأثير يبين الشكل 10-1 الأزمان الديناميكية المختلفة التي يتضمنها التوليد التقليدي (الكهروميكانيكي) والتوليد المقترن بأجهزة الكترونيات القدرة (الكهرومغناطيسي).

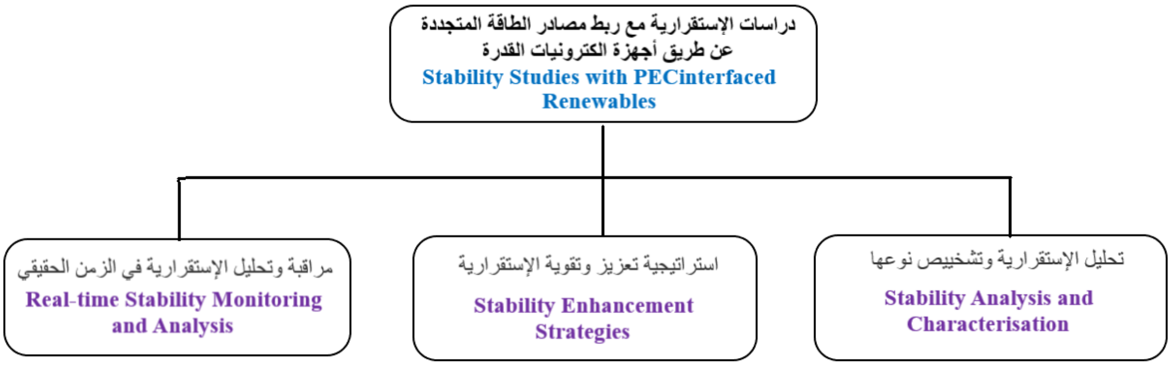


الشكل 10-1 ديناميكية منظومات القدرة المختلفة في جدول الزمن الكهرومغناطيسي والكهروميكانيكي.

إن الديناميكية الحركية لمنظومات القدرة التقليدية (المبنية على أساس التوليد بالمولدات التزامنية) يتم دراستها وتحليلها في زمن يتراوح بين 0.01 إلى 0.001 ثانية ؛ بينما منظومات الطاقة المتجددة المربوطة بواسطة أجهزة ألكترونيات القدرة للشبكة فان تحليلها الديناميكي يكون بين 0.0001 إلى 0.000001 ثانية. هذه الفروقات بالأزمان سببها عمليات الفتح والغلق Switching السريعة التي يقوم بها جهاز المغير Invertor الذي يغير الفولتية أو التيار من تيارمستمر إلى نيار متناوب. لذلك فان زمن تحليل الإستقرارية هنا قد يصل إلى مقياس المايكروثانية بسبب الديناميك المعقد التي تتضمنه أجهزة الكترونيات القدرة التي ترتبط مع مصادر الطاقة المتجددة. بصورة عامة فان مشاكل الإستقرارية التي برزت بسبب الربط والإدخال الواسع لمصادر الطاقة المتجددة في الشبكات الكبرى هي:

- استقرارية زاوية الدوار / استقرارية الإشارة الصغيرة Rotor angle stability/small-signal stability
- استقرارية الفولتية Voltage stability
- استقرارية التردد Frequency stability
- التفاعلات البينية دون التزامنية والإستقرارية التذبذبية Sub-synchronous interactions and oscillatory stability

على هذا الأساس فان دراسات الإستقرارية عند شمول مصادر الطاقة المتجددة في الشبكات الكبرى تصنف إلى ثلاث فئات كما مبينة في الشكل 10-2 .



الشكل 10-2 تصنيف دراسات الإستقرارية عند شمول مصادر الطاقة المتجددة في الشبكات الكبرى.

وتكمن أهمية دراسات وتحليلات الإستقرارية وتشخيص أنوعها في تخطيط منظومات القدرة وفعاليات الشبكات الكبرى التي يتم على أساسها وضع استراتيجيات لتعزيز وتقوية الإستقرارية وهذه أيضاً تفيد في تخطيط منظومات القدرة ووضع نظم لإدارتها وتشغيلها بالشكل الصحيح . في العقود الماضية عند انتشار استخدام الإنترنيت في العالم تم استخدام وحدة قياس الطور Phasor Measurement Unit (PMU) لمراقبة وتحليل الإستقرارية في الزمن الحقيقي ، هذه الدراسات المباشرة التي تسمى بالدراسات على – الخط (Online) توفر أدوات وطرق لإعطاء معلومات مهمة وواسعة للأشخاص العاملين على تشغيل المنظومة لمساعدتهم في صنع قرارات حكيمة وضرورية لتخفيف تأثير أية تهديدات محتملة على استقرارية الشبكة الكبرى.

من ناحية أخرى ، تم في السنوات الأخيرة معرفة حقيقة أن قابلية منظومات الطاقة المتجددة المشبوكة مع الشبكات الكبرى على تجاوز العطل الخلالي (المباشر) يؤثر تأثير ملحوظ على استقرارية منظومة القدرة . ويعرف مصطلح تجاوز العطل الخلالي المباشر Fault- Ride-Through (FRT) بوصفه : " قابلية وحدات التوليد ومصادر الطاقة المتجددة على تحمل الأعطال والإضطرابات الشديدة التي تحدث

علي منظومات النقل في الشبكات الكبرى عندما تكون هذه المصادر التوليدية مربوطة إلى دوائر سليمة من العطل" ، وهذا المصطلح تم إدخاله في كودات الشبكة الكبرى للمملكة المتحدة (بريطانيا) سنة 2006 . لذلك سنقوم بمناقشة موضوع تجاوز العطل الخلالي ضمن هذا الفصل نظراً لكونه جزءً مهماً في التأثير على استقرارية منظومة القدرة وشرح مشاكل الإستقرارية التي برزت بسبب الربط والإدخال الواسع لمصادر الطاقة المتجددة في الشبكات الكبرى التي تم الطرق اليها وهي كما موضحة في الفقرات التالية:

1-2-10 تأثير مصادر الطاقة المتجددة على استقرارية زاوية الدوار

من المعروف أن استقرارية زاوية الدوار ترتبط ارتباطاً وثيقاً مع المولدات التزامنية العاملة ضمن شبكات القدرة الكبرى . ففي السابق وقبل ربط مصادر الطاقة المتجددة مع هذه الشبكات كانت استقرارية زاوية الدوار كأحد المسائل المهمة والحرجة في منظومات القدرة حيث عرفت استقرارية زاوية الدوار التي تحدث نتيجة الإضطرابات الكبيرة بالإستقرارية العابرة التي تم التطرق اليها وتحليلها تفصيلاً في الفصل الثامن من هذا الكتاب ، وقد أعطي زمن إزالة العطل الحرج كمؤشر رئيس للإستقرارية العابرة.

بصورة عامة استعمل حيز الزمن في تمثيل وتحليل وتقييم استقرارية زاوية الدوار حيث وجد بأن انخفاض قيمة عزم التزامن Synchronous Torque الموجود في الشبكة الكبرى يؤدي إلى حدوث استقرارية زاوية دوار بنمط غير متذبذب ؛ بينما يؤدي انخفاض قيمة عزم الإخماد Damping Torque إلى استقرارية زاوية دوار بنمط متذبذب . وقد تطورت دراسات تقييم زاوية دوار المولد التزامني الذي يتبع اضطراب في شبكة القدرة من خلال معادلة التأرجح المعروفة

$$M.\frac{d^2\delta(t)}{dt^2} = P_m - P_e - k_d \frac{d\delta(t)}{dt^2} \qquad (10.1)$$

حيث k_d هو عامل الإخماد بالنيوتن . متر. ثانية . وقد اعتبرت القدرة الميكانيكية الداخلة للمولد P_m ثابتة خلال الثواني القليلة الأولى للإضطراب ؛ لذلك فان العامل الرئيس لإيجاد استقرارية زاوية الدوار هو القدرة الكهربائية الخارجة P_e للمولد التزامني. في حين أن ثابت القصور الذاتي M ومعامل الإخماد k_d يكونان ثابتين أصلاً.

إن القدرة الكهربائية الخارجة P_e قد تتأثر بقيمة الفولتية التي تتولد على أطراف المولد التزامني التي تسمى (فولتية الطرف Terminal Voltage) عليه فعندما يرتبط مصدر الطاقة المتجددة بالشبكة الكبرى عن طريق أجهزة الكترونيات القدرة PEC فان مقدار فولتية الطرف يساق بالأساس من قبل مصدر الطاقة المتجددة نفسه. ولكون أن زاوية الدوار تقاس عادة بالنسبة إلى زاوية فولتية الطرف أيضاً فان هذا يعني أن

الأخيرة يكون لها أيضاً تأثير مباشر على استقرارية زاوية الدوار. على وجه التحديد فان تقليل قيمة القصور الذاتي التزامني في شبكة القدرة الكبرى فان زاوية فولتية الطرف تنحرف بصورة ملحوظة خلال الإضطرابات مما يؤدي انحرافها الكبير إلى عدم استقرار زاوية الدوار.

10-2-2 تأثير مصادر الطاقة المتجددة على استقرارية الإشارة الصغيرة

تشير استقرارية الإشارة الصغيرة إلى قابلية منظومة القدرة على المحافظة على التزامن خلال حدوث تغييرات صغيرة وتدريجية في المنظومة نفسها. وقد جرت دراسات استقرارية الإشارة الصغيرة غالباً إما باستخدام حيز الزمن أو استخدام طريقة تحليل القيم التمييزية والتي تسمى أيضاً بالقيم الذاتية Eigenvalues . لقد تطرقنا إلى تحليلات استقرارية الإشارة الصغيرة في حيز الزمن كجزء من استقرارية الحالة الثابتة (المستقرة) في الفقرة 6-2 من الفصل السادس . أما تحليلها بالقيم التمييزية (الذاتية) فيتم ذلك بعد بناء النموذج الخطي لفضاء الحالة State-space لمجمل شبكة القدرة الكبرى الذي يتم تمثيله رياضياً بالمعادلات الآتية:

$$\Delta\dot{x} = \boldsymbol{A}\Delta x + \boldsymbol{B}\Delta u \qquad (10.2)$$

$$\Delta y = \boldsymbol{C}\Delta x \qquad (10.3)$$

حيث x هو متجه الحالة State-vector ، $\boldsymbol{A}$ هو مصفوفة الحالة State – matrix ، $\boldsymbol{B}$ هو مصفوفة قيم الإدخال Input-matrix و $\boldsymbol{C}$ هو مصفوفة القيم الخارجة Output-matrix .

ويتم استخدام القيم التمييزية في مصفوفة الحالة $\boldsymbol{A}$ فاذا وقعت هذه القيم في النصف الأيمن من المستوي المركب Complex plane التي تكون قيم حقيقية موجبة حينئذ تعد الشبكة الكبرى في حالة عدم استقرار. ولما كانت مصفوفة الحالة $\boldsymbol{A}$ تحتوي على حالات مولدات الطاقة المتجددة فانها يكون لها تأثير على استقرارية الإشارة الصغيرة للشبكة الكبرى . وقد يتم في بعض الحالات دراسة وتحليل استقرارية الإشارة الصغيرة في حيز الزمن بسهولة أكثر إذا كان الإضطراب الذي تتعرض له المنظومة صغيراً ومتدرجاً بأقل من 10% نسبةً.

مما مر في أعلاه يتبين أن مصادر الطاقة المتجددة تعمل على تحسين استقرارية زاوية الدوار في الشبكات الكبرى وذلك لكون ان هذه المصادر تعمل على تحسين امكانية دعم واسناد الفولتية . مثال على ذلك ففي الدراسات المبكرة للإستقرارية العابرة التي أجريت على حقول انتاج الطاقة بواسطة الرياح المتضمنة استخدام مولدات حثية ذات التغذية المضاعفة Doubly-fed Induction generators (DFIG) أظهرت محاسن هذا النوع من التوليد على الإستقرارية العابرة للمنظومة عندما تعمل بنمط

التحكم بالفولتية مقارنة بالتكنولوجيا التي تستخدم مولدات ثابتة السرعة في حقول توربينات الرياح. كذلك أظهرت الدراسات بان مصادر الطاقة المتجددة التي تستخدم مولدات حثية من نوع DFIG والمرتبطة بالشبكة الكبرى عن طريق أجهزة الكترونيات القدرة PEC تعمل على دعم القدرة المتفاعلة في الشبكة التي تولدها هذه المولدات الحثية وبذلك تحسن من الإستقرارية العابرة للشبكة بصورة ملحوظة. كذلك بينت هذه الدراسات على هذا النوع من حقول طاقة الرياح والذي ينتج فولتية منخفضة LV وفولتية مرتفعة HV فان هذه الحقول عندما تنتج فولتية عالية تعمل على اعطاء دعم لفولتية الشبكة عندما تربط وتتكامل معها. من ناحية أخرى فقد جرت دراسات حول تأثير مصادر الطاقة المتجددة التي تولد الطاقة بواسطة المولدات الحثية من نوع DFIG المرتبطة مع الشبكة الكبرى على القصور الذاتي الكلي في الشبكة فتبين أن هذه المصادر لها تأثير مفيد لتحسين الإستقرارية العابرة للشبكة.

أما بخصوص تأثير مصادر انتاج الطاقة من الضوء بالخلايا الشمسية PV المرتبطة مع الشبكة الكبرى على استقرارية زاوية الدوار فقد بينت الدراسات ان هذا النوع من مصادر الطاقة تعمل على تقليل القصور الذاتي الكلي للشبكة وبذلك يكون لها تأثيرفعال على تحسين الإستقرارية العابرة للشبكة .

مما ورد في اعلاه نفهم أن مصادر الطاقة المتجددة المرتبطة إلى منظومات القدرة بواسطة أجهزة الكترونيات القدرة PEC تمتلك مرونة أكثر بالتحكم في القدرة الفعالة والقدرة المتفاعلة. عليه فان هذه القابلية يمكن أن تستخدم لتحسين الإستقرارية العابرة حيث أنه بتغيير القدرة المتفاعلة سيساعد في تغيير مقدار الفولتية وبالتالي إلى تحسين الإستقرارية العابرة وبالأخص عندما تستخدم المعوضات التزامنية الستاتيكية STATCOM مع مصادر الطاقة المتجددة آنفة الذكر كما سيأتي ذكرها في الفصل الحادي عشر القادم.

3-2-10 تأثير مصادر الطاقة المتجددة على استقرارية الفولتية

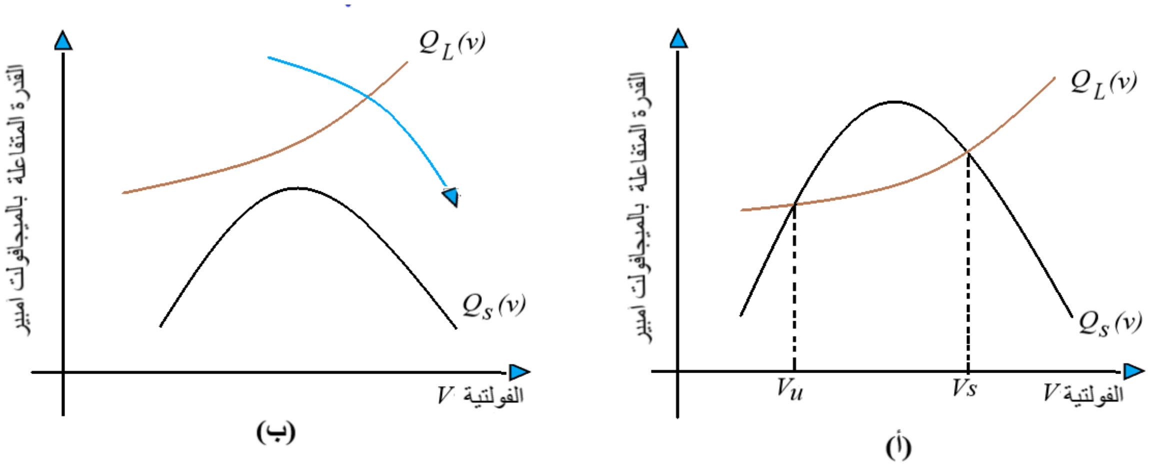
تكمن مشاكل استقرارية الفولتية في مصادر الطاقة المتجددة عن النقص الحاد في احتياطي القدرة المتفاعلة Q لهذه المنظومات وكذلك في ضعف سعة قصر الدائرة في الشبكة عند حدوث عطل ، وتحدث هذه المشاكل بسبب عدم وجود المولدات التزامنية الإعتيادية . ولأجل توضيح هذه المسألة فان مصدر القدرة المتتفاعلة $Q(v)$ عندما يجهز حمل من خلال خط نقل له مفاعلة X_L فانه يمكن ايجاد قيمة القدرة المتفاعلة المنتقلة من المعادلة التالية :

$$Q(v) = \sqrt{\left[\frac{EV}{X_L}\right]^2 - [P_L(v)]^2} - \frac{V^2}{X_L} \qquad (10.4)$$

حيث E هي فولتية المصدر ، V هي فولتية الحمل ، $P_L(v)$ هي قدرة الحمل الفعالة المطلوبة . ووفقاً لنظرية استقرارية الفولتية فان مصدر القدرة المتفاعلة يجب أن يكون قادراً على تلبية حاجة المنظومة من

القدرة المتفاعلة ، لذلك فاذا كانت المنظومة مستقرة عندئذ يجب أن يتقاطع منحنى القدرة المتفاعلة للمصدر مع منحنيات القدرة المتفاعلة للمنظومة كما مبينة في الشكل 10- 3(أ) . لذلك يكون هناك حل واحد معقول يمكن تنفيذه في هذه الظروف الذي تمثله قيمة الفولتية Vs في الشكل 10- 3(ب) . وإذا كان مصدر القدرة المتفاعلة $Q(v)$ غير قادر بما يكفي لتلبية حاجة الحمل من القدرة المتفاعلة فسوف لا يكون هناك نقاط تقاطع بين المنحنيات ، لذلك سوف يحصل انهيار الفولتية في هذه الحالة التي تم توضيحها في الشكل 10 - 3(ب) .

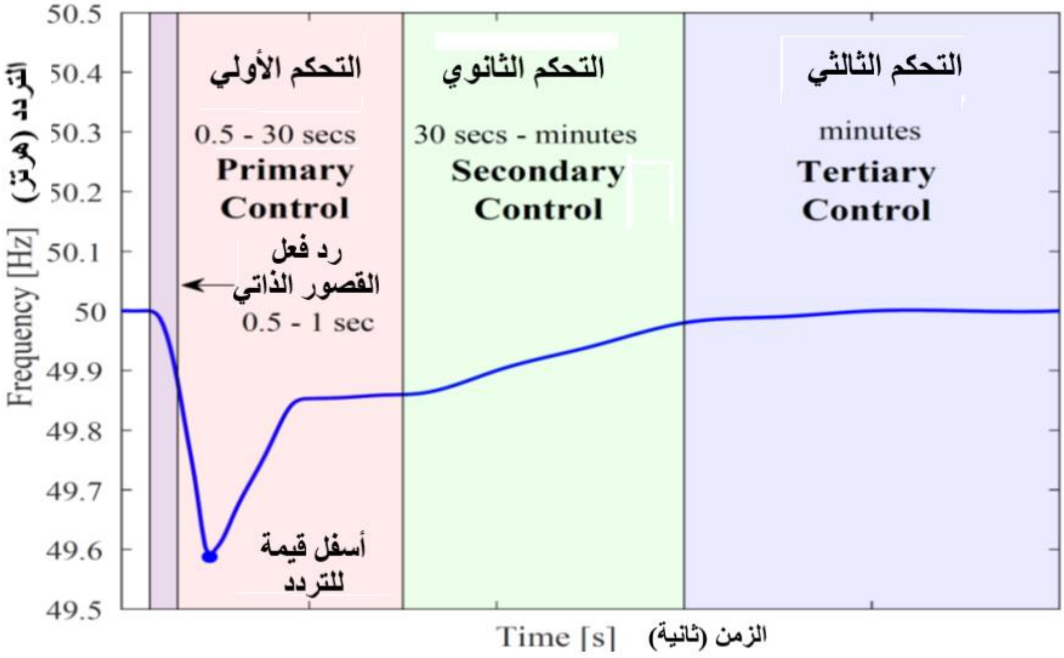
لقد بينت الدراسات أن مصادر الطاقة المتجددة المنتجة من الرياح باستخدام مولدات DFIG إذا تم ربطها مع النقاط الضعيفة في الشبكة فانها تعمل على تحسين حدود الإستقرارية *VQ* . كذلك وجد بان نظام التوليد المتوزع Distributed generation ضمن الشبكة قد يحقق تحسين في استقرارية الفولتية في شبكة النقل.



الشكل 10-3 تمثيل استقرارية الفولتية كتوازن بين التوليد والحمل بالقدرة الفعالة (أ) حالة استقرار ، (ب) حالة التوجه نحو عدم الإستقرار.

10-2-4 تأثير مصادر الطاقة المتجددة على استقرارية التردد

ترتبط استقرارية التردد ارتباطاً وثيقاً باستقرارية الدوار ذلك لأن سرعة دوران المولد التزامني تتتزامن مع سرعة دوار المولد نفسه . لهذا السبب فان أي تغيير في تردد المنظومة ينعكس بالتأكيد على سرعة دوار المولد . كذلك فان استقرارية التردد تكون مرتبطة أيضاً مع التوازن الآني للطلب على القدرة الفعالة والتوليد في شبكة القدرة . وهذا التوازن تتم المحافظة عليه من خلال التحكم بردود الفعل الأولية والثانوية والثالثية. ويبين الشكل 10-4 حالات الأسترداد المختلفة لتردد المنظومة التي تتبع حالة حدوث عدم التوازن بين التوليد والطلب في الشبكة.



الشكل 10-4 ردود الفعل (الإستجابات) الإولية والثانوية والثالثية للتحكم بالتردد.

إن رد الفعل الأولي يتضمن البدء بالإستجابة الأولى للقصور الذاتي الذي يتبعها فعل التحكم الأولي حيث تكون فترتها من 0.5 إلى ثانية واحدة . بصورة عامة تكون المولدات التزامنية مرتبطة ارتباطاً مباشراً (ارتباطاً ميكانيكياً) بالشبكة الكبرى . فاذا حدث أي تغيير في التردد فان هذه المولدات يجب أن تكون قادرة على تجهيز أو امتصاص طاقة حركية للمساعدة على استقرار التردد للمنظومة من خلال استجابة القصور الذاتي أو الإستجابة الطبيعية. هذه الإستجابة الطبيعية أو استجابة القصور الذاتي التي تأتي من المولد المربوط بالشبكة بصورة مباشرة يمكن تقريبها بالمعادلة

$$\Delta P_{gen} = \frac{-2E_{gen}}{f_o}\frac{df}{dt} \qquad (10.5)$$

حيث E_{gen} هي سعة خزن الطاقة للمولد بالميجاواط . ثانية ، f_o هي تردد المنظومة الإسمي القياسي بالهيرتز ، و $\frac{df}{dt}$ يمثل معدل تغير التردد مع الزمن بالهيرتز لكل ثانية خلال فترة الإضطراب.

ويلاحظ أن جميع المكائن التزامنية يصيبها رد الفعل هذا خلال الإضطراب ويكون عملها مساندة التردد للفترة الزمنية الأولى من 0.5 إلى 1.0 ثانية . ويتضمن رد الفعل الأولي الذي يتبع رد فعل القصور الذاتي ضبط قيمة القدرة الفعالة التي تجهزها الماكنة التزامنية لغرض إحداث تغيير في التردد وبذلك يساعد في عملية استقرار المنظومة ، ويكون رد الفعل الأولي هذا خطياً (أي يتناسباً تناسباً طردياً) حيث يتم تمثيل المولد التزامني آنئذ بالمعادلة

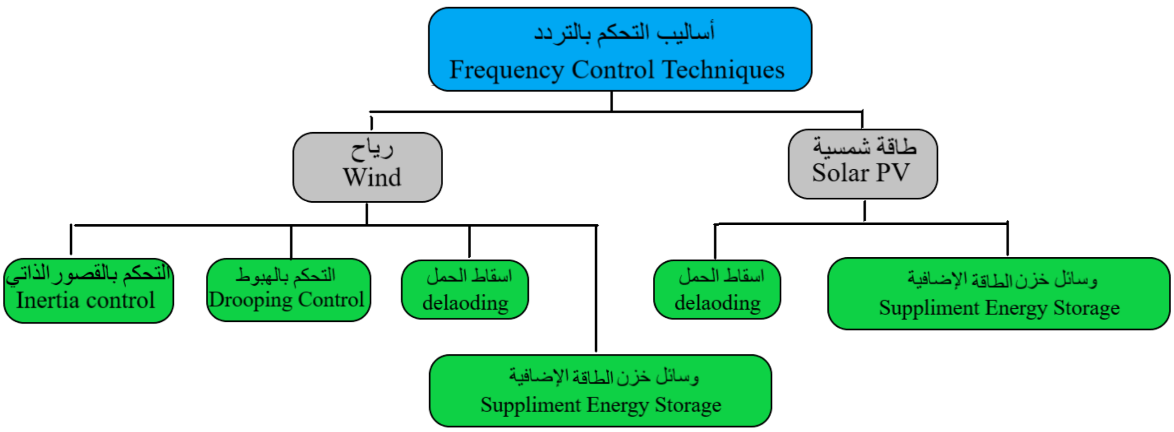
$$\Delta P_{m,i} = -\frac{1}{R_i}\Delta f \qquad (10.6)$$

حيث $\Delta P_{m,i}$ هو التغير في القدرة الخارجة لتوربين وحدة التوليد رقم (i) بالميجاواط ، $\frac{1}{R_i}$ هو ثابت الإنخفاض بالتنظيم ، Δf هو الإنحراف بالتردد عن القيمة الإسمية بالهيرتز. فاذا كان لدينا مجموعة من المولدات عددها G مولد فسوف يكون التغير في القدرة الكلية ضمن المنظومة هو مجموع التغيرات لكل مولد كما معطى رياضياً بالمعادلة

$$\Delta P_{tot} = \sum_{i \in G} \Delta P_{m,i} \qquad (10.7)$$

على أية حال فان رد الفعل الأولي لا يستطيع إرجاع التردد إلى قيمته الأصلية ذلك لكونه يستخدم سيطرة من النوع التناسبي Proportional control . أما رد الفعل الثانوي للتردد والذي يسمى أيضاً بالتحكم التلقائي الثانوي للتوليد Automatic Generation Control (AGC) الذي يتبع رد الفعل الأولي لإرجاع التردد إلى قيمته الأسمية الأصلية من خلال استخدام مسيطر من نوع تناسبي- تكاملي (PI) .

ولما كانت مصادر الطاقة المتجددة المنتجة من حقول الرياح والخلاية الشمسية تعتمد في توليدها على الإحتمالية Stochastic فان انتاج هذه المصادر للطاقة يكون غير مؤكد ، لذلك فانها تؤثر على استقرارية التردد لمنظومة القدرة بسبب التقلبات في توليد القدرة الفعالة المنتجة وبالتالي إلى إحداث تذبذب في تردد المنظومة. لذلك يتم استخدام تحكم منسق Coordinate control لجعل التقلبات في الطاقة المنتجة أكثر سلاسة . كذلك تستخدم منظومات لتخزين الطاقة كالبطاريات الكهربائية وغيرها من طرق الخزن لمساندة منظومات الخلايا الشمسية ، ويوضح الشكل 10-5 ملخص للطرق الرئيسية المستخدمة لدعم مسألة تذبذب التردد في حقول الرياح وحقول الخلايا الشمسية .



الشكل 10-5 طرق التحكم الرئيسية بالتردد لمنظومات الرياح والخلايا الشمسية .

5-2-10 التفاعلات البينية دون التزامنية والإستقرارية التذبذبية

الإستقرارية التذبذبية والتفاعلات البينية دون التزامنية (SSI) هما نوعان من أنواع الإستقرارية التي تخص الشبكات الكبرى الغنية بمصادر الطاقة المتجددة . هذه التذبذبات تم رصدها إما على شكل تذبذبات قدرة أو تذبذبات فولتية . وقد تم تصنيف تذبذبات القدرة إلى نوعين :

1) التذبذبات ذات التردد المنخفض
2) التفاعلات البينية دون التزامنية وفوق التزامنية وظاهرة الرنين

وتحدث التذبذبات ذات التردد المنخفض ضمن المدى من 0.1 هرتز إلى 3 هرتز وتقسم إلى ثلاثة أنماط:

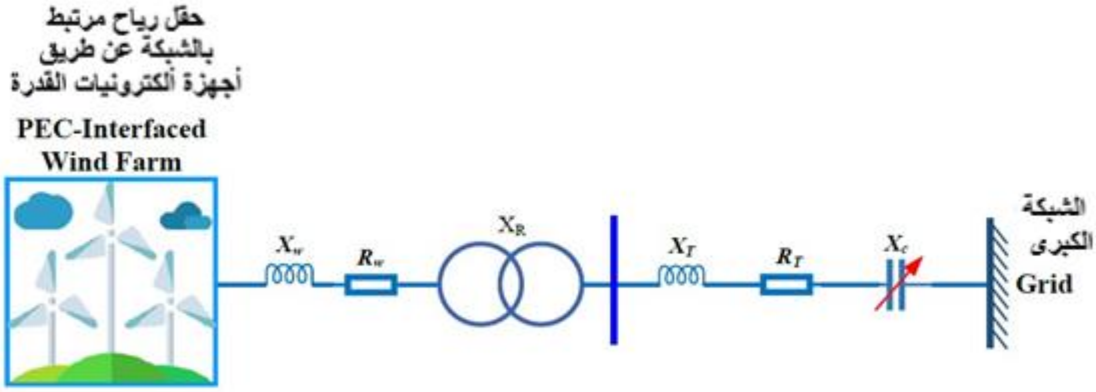
1) التذبذبات الموقعية لمجموعة المكائن التوليدية ضمن محطة واحدة
2) التذبذبات التي تحصل بين محطات التوليد
3) التذبذبات التي تحصل بين مناطق واسعة

لقد جرت العادة في اختبار ودراسة هذه الأنماط من التذبذبات باستخدام التحليل الخاص بإستقرارية الإشارة الصغيرة باستعمال اسلوب إيجاد القيم التمييزية الذي تمت الإشارة إليه في الفقرة 10-2-2 السالفة مع أنه بينت بعض الدراسات بأن مصادر الطاقة المتجددة المربوطة للشبكة عن طريق أجهزة ألكترونيات القدرة تقلل من فعل الإخماد بسبب طبيعة فصل الديناميكية الميكانيكية لمنظومات تحويل طاقة الرياح المربوطة عن طريق أجهزة ألكترونيات القدرة (WECSs) عن الديناميكية الكهربائية. أما التفاعلات البينية دون التزامنية التي تنشأ في حقول الرياح المربوطة مع خطوط النقل ذات تعويض التوالي Series compensation عن طريق أجهزة الكترونيات القدرة فقد لاقت اهتمام كبير خلال العقد الماضي بسبب تزايد استخدام حقول الرياح المرتبطة بالشبكة عن طريق أجهزة الكترونيات القدرة من خلال خطوط النقل الطويلة .

إن التفاعلات البينية دون التزامنية والتذبذبات الخاصة بها يمكن تصنيفها إلى ثلاثة أنواع :

1) الرنين بالتردد دون التزامني Sub-synchronous resonance (SSR)
2) الألتواء التفاعلي دون التزامني Sub-synchronous torsional interaction
3) التحكم بالتفاعلات البينية دون التزامنية Sub-synchronous control interaction (SSCI)

لقد جرت العادة على استخدام اسلوب تحليل القيم التمييزية سوية مع المسح الترددي في دراسات التحكم بالتفاعلات البينية دون التزامنية SSCI ، أما ظاهرة SSI فيمكن أن يتم توضيحها من خلال الشكل 10-6.



الشكل 10-6 حقل رياح مربوط إلى خط نقل ذي تعويض توالي.

إن تردد الرنين (f_r) الذي يحصل بين حقل الرياح المربوط إلى خط نقل ذي تعويض توالي يمكن إيجاده من المعادلة التالية

$$f_r = f_o \sqrt{\frac{X_C}{X_W + X_R + X_T}} \Omega \qquad (10.8)$$

حيث أن :

f_o = التردد الآسمي القياسي للشبكة بالهرتز
X_C = مفاعلة متسعة التعويض المربوطة على التوالي Ω
X_W = مفاعلة حقل الرياح Ω
X_R = مفاعلة المحول Ω
X_T = مفاعلة خط النقل Ω

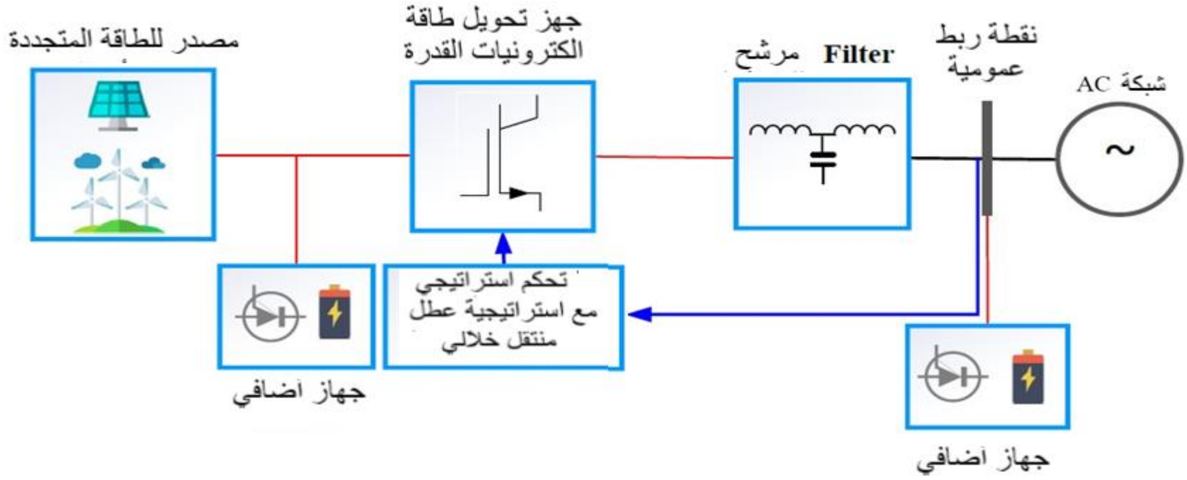
في ظاهرة الرنين بالتردد دون التزامني Sub-synchronous resonance (SSR) الشائعة يتطابق تردد الرنين مع التردد الطبيعي لمنظومة التدوير للمولد وهذا يمكن أن يخلق تذبذبات غير مخمدة بين الشبكة ومنظومة التدوير للمولد. هذه الظاهرة المألوفة لا تطبق بالضبط على منظومات الطاقة المتجددة المربوطة للشبكة عن طريق أجهزة الكترونيات القدرة وذلك بسبب الربط الوسيط Interface بين أجهزة الكترونيات القدرة والمنظومة الميكانيكية وبين الشبكة الكهربائية . على أية حال فان هذه الظاهرة قد تحدث ضمن ترددات متعددة اعتماداً على ظروف التشغيل لأجهزة الكترونيات القدرة التي تربط منظومات الطاقة المتجددة وقد تزيد من حدتها بسبب اساليب التحكم المستخدمة وهذا يصنف بوصفه التحكم بالتفاعل دون التزامني Sub-synchronous control interaction (SSCI).

إن ظاهرة SSCI هي الأكثر شيوعاً في منظومات الطاقة المتجددة عندما ترتبط مع الشبكة حيث برزت هذه الظاهرة كمشكلة في حقول الرياح من نوع DFIG عند ربطها بخطوط نقل ذات تعويض توالي وذلك لكون أن الممانعة بين المولدات التي تعمل بطاقة الرياح وخط النقل تصبح قيمتها صفراً سالباً (أي تبدأ قيمها بالتحول من القيم الموجبة إلى القيم السالبة) عند التذبذب دون التزامني الذي يؤدي إلى نشوء ظاهرة الرنين. لقد بينت الدراسات المستفيضة في هذا المجال أن ظاهرة SSCI تحدث ليس فقط بسبب المقاومة السالبة وإنما أيضاً بسبب حدوث الرنين بين مولد الطاقة من الرياح والشبكة الكهربائية نفسها. كذلك تم بيان أن نمط نشوء التذبذب المخمد ذي القيمة المنخفضة قد يخلق احتمال نشوء ظاهرة SSCI بين الشبكة وحقول الرياح. لكن هذا النمط من التذبذب يمكن إخماده كلياً بواسطة ضبط قيمة الكسب Gain لجهاز التحكم ضمن الـ SSCI .

10- 3 تأثير انتقال العطل الخلالي لمصادر الطاقة المتجددة على إستقرارية منظومة القدرة

تتأثر استقرارية منظومة القدرة التي تحتوي على مصادر(منظومات) كثيرة للطاقة المتجددة RES بالعطل الذي يحدث في هذه المصادر المربوطة اليها وينتقل من خلالها إلى شبكة المنظومة نفسها ، ويحدد نوع العطل وقوته قابلية مصدر الطاقة المتجددة على البقاء مربوط بالشبكة خلال فترة العطل ومساعدة الشبكة على استعادة حالتها الطبيعية بعد عملية إزالة ذلك العطل.

أن وجود مصادر الطاقة المتجددة المرتبطة بالشبكة عن طريق أجهزة ألكترونيات القدرة بالقرب من مركز الحمل يساعد في تأمين خدمات إضافية مثل : تجهيز القدرة المتفاعلة لتحسين عملية إسناد الفولتية خلال حصول انخفاض وتدلي في الفولتية في بعض المناطق المتسبب عن العطل الحادث في الشبكة. هذه الخدمة ممكن أن تؤمنها مصادر الطاقة المتجددة كما موضح ربطها بالشبكة في الشكل 10-7 .



الشكل 10-7 توضيح لمصدر طاقة متجددة مرتبط إلى الشبكة عن طريق أجهزة الكترونيات القدرة مع افتراض انتقال للعطل الخلالي في عدة مواضع مختارة.

خلال فترة العطل ، تعمل مصادر الطاقة المتجددة المربوطة إلى الشبكة بصفة معوض قدرة استاتيكي STATCOM بتجهيزها قدرة متفاعلة لتحسين استقرارية الفولتية للشبكة خاصة تلك المصادر التي تحول الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية التي يطلق عليها PV-STATCOM وتعمل هذه المصادر أيضاً على زيادة سعة إنتقال القدرة لخط النقل خلال فترة إزالة العطل وتحسين استقرارية الشبكة.

أما بالنسبة إلى حقول انتاج الطاقة من الرياح والمرتبطة بالشبكة عن طريق أجهزة ألكترونيات القدرة فانها قد تؤثر سلباً على استقرارية الشبكة الكبرى أثناء حصول عطل أو اضطراب شديد في الشبكة نفسها. لذلك يجب أن تكون مصادر الطاقة هذه لها القابلية على تحمل العطل الذي يحدث بالشبكة باتباع تدابير مختلفة لانتقال العطل الخلالي التي من شأنها المساعدة على استعادة الشبكة لحالتها الطبيعية بعد أوخلال حدوث العطل أو في الأقل بقاء هذه المصادر مربوطة بالشبكة . لقد أظهرت دراسات كثيرة أن مصادر الطاقة هذه تكون بصورة عامة غير حصينة للأعطال والإضطرابات والإنخفاضات في الفولتية التي تحدث في الشبكة الكبرى.

4-10 مشاكل الإستقرارية في الشبكات الكبرى الهجينة

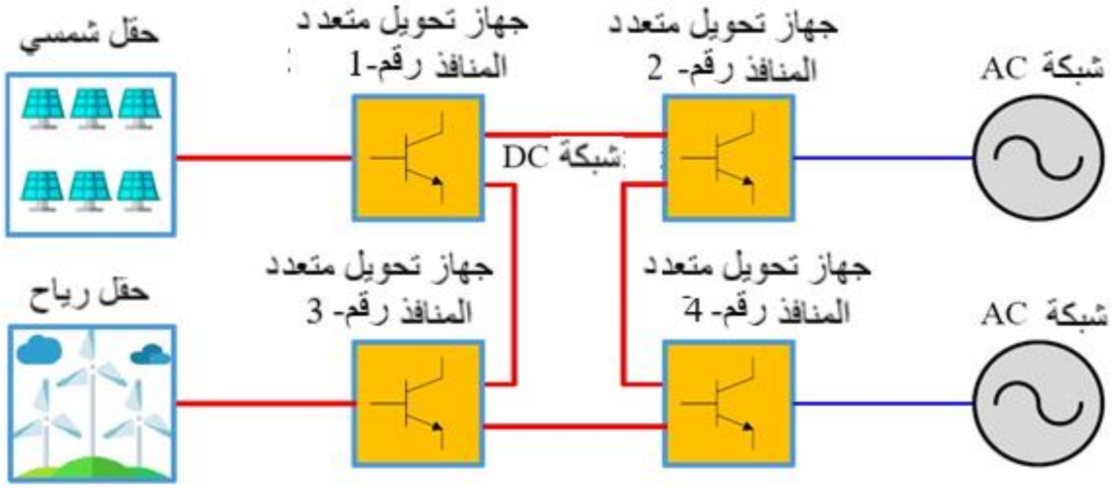
Stability Issues of Emerging Hybrid AC/DC Power Grids

يقصد بالشبكات الهجينة هي الشبكات التي تحتوي على خليط من شبكات تعمل بالتيارالمتناوب وشبكات تعمل بالتيار المستمر AC/DC مربوطة إلى بعضها البعض حيث أنه في الوقت الحاضر حدث تغيير مستمر في بنية الشبكات الكبرى لغرض مكاملة وربط مصادر الطاقة المتجددة مع هذه الشبكات . مثال على ذلك التوجه الكبير المتزايد في توليد ونقل الطاقة الكهربائية من الحقول والمواقع البعيدة (مثل حقول الرياح الواقعة على سواحل البحار وحقول انتاج الطاقة من الشمسSolar- PV) وربطها إلى منظومة القدرة ذات التيار المتناوب من خلال روابط (وصيلات) ذات فولتية مستمرة عالية HVDC . هذه الروابط تكون مربوطة إلى محطات تحويل طاقة ذات منافذ متعددة لتكوين شبكة ذات فولتية مستمرة عالية تعمل جنباً إلى جنب مع شبكة التيار المتناوب الأصلية لتشكيل بالنهاية شبكة قدرة هجينة كما مبينة في الشكل 10-8 . أما معدات تحويل الطاقة هذه فتتصرف تصرفاً مختلفاً عن معدات وأجهزة شبكة التيار المتناوب الأصلية وبذلك ينجم عن عملها مشاكل في استقرارية منظومة القدرة الأصلية. من هذه المشاكل المعروفة والشائعة ندرج الآتي:

(أ) المشاكل الناجمة عن نشوء التوافقيات والرنين

Harmonics and Resonance Issues

من المعروف أن أجهزة الكترونيات القدرة المبينة في الشكل 10-8 التي تقوم بابدال الطاقة من صيغة إلى أخرى تحتوي على مرشحات ونبائط فتح وتوصيل Switching devices (مثل الثايرستورات وترانسستورات عالية القدرة ثنائية القطب ذات البوابة المعزولة من نوع IGBT) التي



الشكل 10-8 شبكة هجينة AC/DC ذات اربعة منافذ.

تعمل بتردد عالٍ (أعلى من 1000 هرتز في الغالب) والتي تؤدي إلى نشوء توافقيات على نطاق واسع من الترددات التي تلوث الشبكة . إن المرشحات المستخدمة في هذه الأجهزة قد تقلل من بعض التوافقيات ذات الترددات المعينة ، لكن لايمكن التخلص من معظم هذه التوافيات بصورة كاملة . لذلك فان القدرتين الفعالة والمتفاعلة اللتان يتم حقنهما إلى الشبكة بواسطة مغيرات (عاكسات) الفولتية (VSC) Volage Source Inverters سوف تحتويان على توافقيات غير مرغوب فيها كون ان التيار المحقون تكون صيغة موجته غير جيبية تماماً. هذه التوافقيات تؤثر على عمل الأجهزة الأخرى في الشبكة وتؤدي في الغالب إلى زيادة مفاقيد القدرة وقد تسبب هذه المفاقيد إلى زيادة تسخين بعض المعدات والأجهزة ونشوء خطرحدوث الحرائق . إضافة إلى ذلك فان المرشحات من نوع LCL (محاثة -متسعة- محاثة) المستخدمة في أجهزة التحويل VSC يمكن أن تسبب في توليد توافقيات بتردد رنين وهذا الرنين قد ينتشر إلى المرشحات الأخرى من النوع نفسها ا لمربوطة على التوازي في هذه الأجهزة المذكورة وبالتالي إلى حدوث خطر الرنين في منظومة القدرة كلها. وفي شبكات نقل التيار المستمر ذات الفولتية العالية HVDC تستخدم فيها أجهزة تحويل طاقة من النوع المتعدد المستويات (MMC) Modular multilevel converter يعمل عمل الوسيط الرابط بين شبكتي التيار المتناوب والتيار المستمر . هذه الأنواع من أجهزة التحويل المؤلفة من

أذرع ثانوية عديدة قد تحصل بينها تيارات دوارة تؤدي إلى تشويه موجة الفولتية الخارجة منها وبالتالي تسبب عدم استقرار في عمل هذه الأجهزة وفي النهاية تؤدي إلى مشاكل في استقرارية منظومة القدرة.

(ب) المشاكل الناجمة عن أجهزة التحكم والسيطرة ضمن محولات الطاقة

Converter Controller Driven Stability Issues

مع أن أجهزة الكترونيات القدرة التي تربط مصادر الطاقة المتجددة إلى الشبكات الكبرى تمتلك مرونة في التحكم والسيطرة إلا أنها تتطلب في عملها منظومات تحكم وسيطرة ذات تصميم معقد . هذه المنظومات المسيطرة المعقدة تؤثر بشكل أو بآخر على استقرارية الشبكة الكبرى. وقد بينت الدراسات في هذا المجال أن المتحكمات في الفولتية لها السبب الكبير في حصول ظاهرة الرنين الكهروميكانيكي للمنظومة . ففي منظومات HVDC ذات المنافذ المتعددة فان الطريقة المتبعة للتحكم بالإنخفاض أو التدلي في فولتية التيار المستمر DC Voltage هي الطريقة التقليدية الشائعة نفسها المتبعة في التحكم في فولتية التيار المستمر .
أما القدرة الفعالة الخارجة من اجهزة تحويل الطاقة ذات المنافذ المتعددة فيتم أيجادها من المعادلة :

$$P = P_{ref} - \frac{1}{K_{dc}}\left(V_{dc} - V_{dcref}\right) \qquad (10.9)$$

حيث :

P = القدرة الفعالة بنسبة الوحدة
P_{ref} = القدرة الفعالة المرجع بنسبة الوحدة
K_{dc} = كسب التدلي (الإنخفاض) لجهاز التحكم
V_{dc} = فولتية التيار المستمر بنسبة الوحدة
V_{dcref} = فولتية التيار المستمر المرجع بنسبة الوحدة

أن التحكم بانخفاض الفولتية يمكن أن يؤدي إلى تحميل زائد على جهاز تحويل الطاقة وبالتالي إلى حدوث إنحراف كبير في مقدار الفولتية . لقد بينت الدراسات أيضاً وجود تفاعل بين عملية التحكم بفولتية التيار المتناوب وعملية التحكم بفولتية التيار المستمر خاصة عندما تكون منظومة التيار المتناوب ضعيفة نوعاً ما حيث يؤدي ذلك إلى حصول رنين . أما بخصوص تأثير عملية التحكم على القدرة المتفاعلة فقد وجد بأن التغير في هذه القدرة مع المدى الذي تتغير فيه فولتية التيار المتناوب يمكن أن يكون له تأثير وخيم على أخماد وتوهين التذبذبات لمنظومة القدرة بصورة عامة.

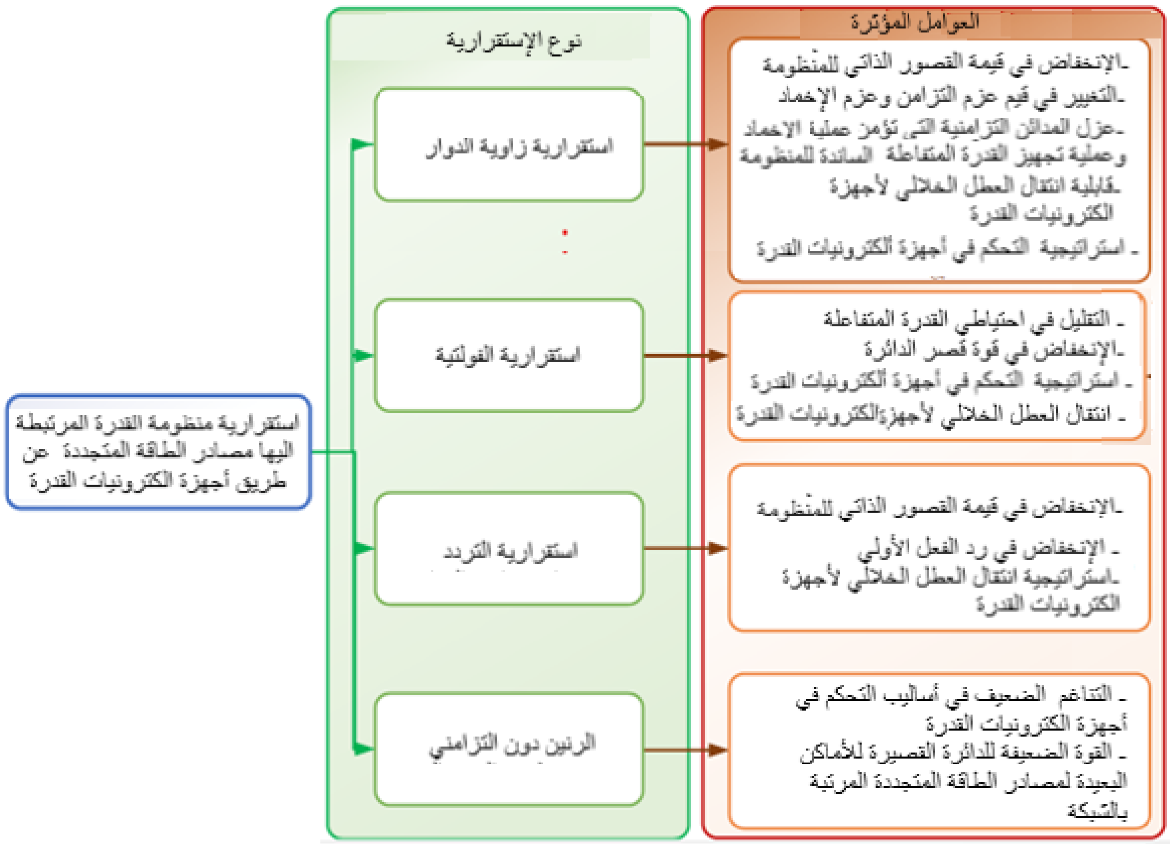
(جـ) مشاكل الإستقرارية الناجمة عن أجهزة الحماية

تختلف طرق الحماية لمنظومات القدرة الهجينة AC/DC عن تلك التي تستخدم لحماية منظومات القدرة ذات التيار المتناوب . هذا الإختلاف من شأنه أن يؤدي إلى مشاكل في الإستقرارية . ففي شبكات

القدرة الكبرى يمكن أن يتم عزل الجزء المتعرض فيها للعطل عند مرور تيار العطل بالنقطة التي يكون فيها قيمته صفراً . أما في شبكات التيار المستمر فانه لاتوجد نقطة مرور للفولتية بقيمة الصفر ، لذلك يتطلب ربط مفاعل تيار مستمر DC Reactor لغرض تقليل معدل التغير في تيار العطل . إلا أنه وجد بأن في حالة كون قيمة المفاعل هذا كبيرة فانه سوف يؤثر على المسافة الكهربائية بين أجهزة تحويل الطاقة نفسها مما يؤثر على استقرارية شبكة HVDC نفسها. علاوة على ذلك فانه في بعض حالات العطل قد يحصل تقييد وإيقاف للترانستورات القدرة من نوع IGBT عن العمل لكن الدايودات المربوطة معها بصورة عكسية يمكن ان تبقى عاملة ومؤثرة ايجابياً وتعمل على تدفق القدرة .

5-10 التوجه العالمي نحو شبكات كبرى تعمل بمصادر الطاقة المتجددة بنسبة 100%

مما مر في أعلاه فقد تبين أن مصادر الطاقة المتجددة تؤثر على استقرارية منظومة القدرة المرتبطة اليها عن طريق أجهزة الكترونيات القدرة . هذا التأثير إما أن يكون إيجابياً أو سلبياً. وخلاصة القول فان العوامل الرئيسية المؤثرة على كل نوع من أنواع الإستقرارية هي كما ملخصة في الشكل 10-9.



الشكل 10-9 العوامل الرئيسية التي تؤثر على كل نوع من أنواع الإستقرارية لمنظومات القدرة المربوطة إليها مصادر الطاقة المتجددة عن طريق أجهزة الكترونيات القدرة.

بالتبصر في الشكل 10-9 فان العوامل المتمثلة في التخفيض في القصور الذاتي للمنظومة والإنخفاض في احتياطي القدرة المتفاعلة وقابلية أجهزة الكترونيات القدرة على تحمل انتقال العطل الخلالي واستراتيجيته وكذلك قوة التحمل لعطل قصر الدائرة للمنظومة جميعها عوامل تلعب دوراً رئيساً في التأثيرعلى استقراية منظومة القدرة والشبكات الكبرى الغنية بمصادر الطاقة المتجددة المربوطة إليها عن طريق أجهزة الكترونيات القدرة . ولما كانت شبكات القدرة تتجه في الوقت الحاضر اتجاهاً تدريجياً إلى أن تكون مصادر الطاقة فيها مبنية أساساً على مصدر الطاقة المتجددة بنسبة 100% بالأخص تلك الشبكات تكون مصادر الطاقة فيها معتمدة فيها كلياً على محطات حرارية تعمل بالوقود الإحفوري (الفحم النفط والغاز) فانها على الأرجح أن تتحول هذه المصادر للطاقة إلى مصادر طاقة متجددة بنسبة 100% في االمستقبل . أما بالنسبة إلى الشبكات الكبرى التي تمتلك محطات تقليدية تعمل بطاقة المياه لانتاج الطاقة فسوف يكون تغلغل مصادر الطاقة المتجددة اليها أيضاً على مستوى كبير في المستقبل.

الفصل 11 طرق تحسين إستقرارية منظومات القدرة

Methods of Improving power systems stability

1-11 مقدمة

في الفصول العشرة السابقة تم التطرق إلى وصف الأوجه الفيزيائية للفئات المختلفة من استقرارية منظومات القدرة بالإضافة إلى تغطية الطرق الخاصة بحلولها وكذلك العوامل المهمة الأساسية التي تؤثر في زيادة مشاكلها وطرق تخفيف تأثيرها . هذا الفصل الحادي عشر يناقش الطرق الخاصة المستخدمة في تحسين الإستقرارية العابرة واستقرارية الإشارة الصغيرة . هاتان الفئتان من فئات استقرارية منظومات القدرة نالتا إهتماما كبيراً في ستينيات القرن الماضي وقد شملت طرق تحسينها الفئات الأخرى للإسقرارية أيضاً.

لأية منظومة قدرة معينة قد لا توجد طريقة واحدة كافية لتحسين استقراريتها . والاسلوب الأمثل هو استخدام مجموعة من الطرق يتم اختيارها بشكل حكيم للمساعدة في المحافظة على الإستقرارية في حالات الطوارئ المختلفة لظروف هذه المنظومة ، وفي حالة تطبيق هذه الطرق لحل مسائل الإستقرارية يجب أن يؤخذ أداء المنظومة العام بعين الإعتبارقبل كل شئ.

إن طرق تحسين الإستقرارية التي سيتم وصفها في هذا الفصل هي اختيارية بحته ويجب أن يلاحظ في اختيارها النواحي الاقتصادية في تصميم المنظومة حيث أن التصميم القويم والصحيح وامكانية تطبيقه قد يجعلان هذه الطرق تساهم بشكل كبير في مرونة اشتغال المنظومة وبدون التنازل عن الجوانب الأخرى في أداء المنظومة الجيد.

2-11 طرق تحسين الإستقرارية العابرة

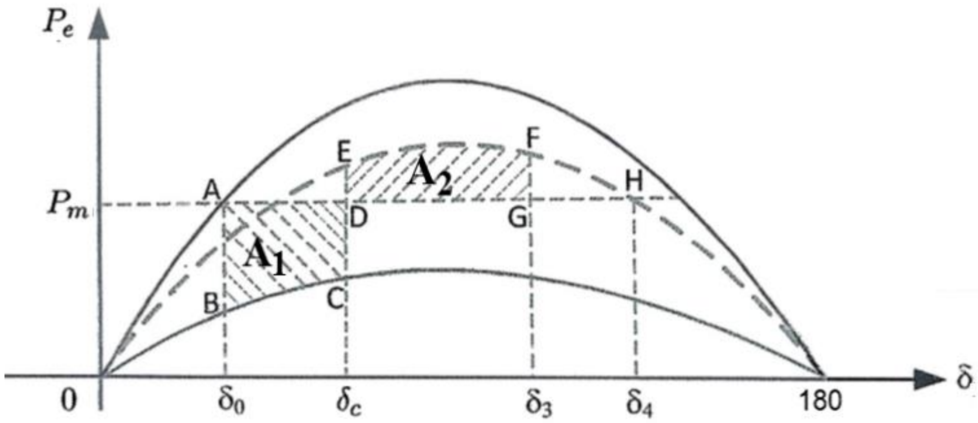
إن الإستقرارية العابرة يمكن تحسينها بأحد الطرق التالية أو أكثر:

1. تقليل تأثير الإضطراب وذلك بتخفيض قوة العطل
2. زيادة قوة استعادة عملية التزامن بين المولدات
3. تقليل عزم التسارع (التعجيل) من خلال السيطرة على القدرة الميكانيكية للمدور الأساسي
4. تقليل عزم التسارع من خلال إدخال أحمال مصطنعة خارجية.

وفي الفقرات التالية سيتم إعطاء وصفاً للطرق المذكورة في أعلاه.

3-11 إزالة العطل بالسرعة العالية

إن كمية الطاقة الحركية التي يحصل عليها دوار المولد التزامني خلال العطل تتناسب طردياً مع فترة بقاء العطل نفسه ، حيث أنه كلما تمت إزالة العطل بسرعة فان تأثيره يكون أقل. هذا الاسلوب يجعل مساحة التباطؤ A_2 أكبر من مساحة التسارع A_1 في الشكل 10-1 باختيار جيد لزاوية إزالة العطل δc وذلك باستخدام قواطع دائرة عالية السرعة .



الشكل 11-1 .

في الوقت الحاضر تستخدم قواطع دائرة ذات الدورتين Two-cycle breaker سوية مع مرحلات حماية عالية السرعة التي تعتمد على تقنية الإتصالات فيما بينها ؛ هذه الطريقة تستخدم في المواقع التي تتطلب إزالة العطل فيها بسرعة من الأمور المهمة جداً. ومع أنه في بعض الأحيان تستخدم القواطع السريعة ذات الدورة الواحدة On-cycle breaker إلا أن استخدامها لم ينتشر بصورة واسعة. وخلاصة القول بأن اختيار زاوية الإزالة δc يجب أن تكون أقل بكثير من زاوية الإزالة الحرجة وهذا يعتمد على عاملين رئيسيين:

- شدة وقساوة العطل ، حيث يعتبر العطل ثلاثي الطور المتماثل أقسى أنواع العطل على الإطلاق.
- موقع العطل ، وهو إما أن يكون قريب جداً من مصدر التوليد أو بعيد عنه.

إن تقليل زاوية إزالة العطل يمكن أن يتحقق بتقليل زمن إزالة العطل حيث أن زمن إزالة العطل يرتبط مع زاوية إزالة العطل بالمعادلة

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + \frac{(\Delta t)^2}{M} P_{acc(n-1)}$$

إن زمن إزالة العطل يمكن يقلل باستخدام حماية تفاضلية Differential protection كونها سريعة جداً أو باستخدام قواطع دائرة ذات الإغلاق الذاتي التلقائي .Auto-reclosing C.B ، كذلك يمكن أيضاً زيادة عزم القصور الذاتي M لدوار الماكنة ، إلا أن هذا يكون صعب جداً وغير اقتصادي بالمرة .

4-11 تقليل مفاعلة منظومة النقل X

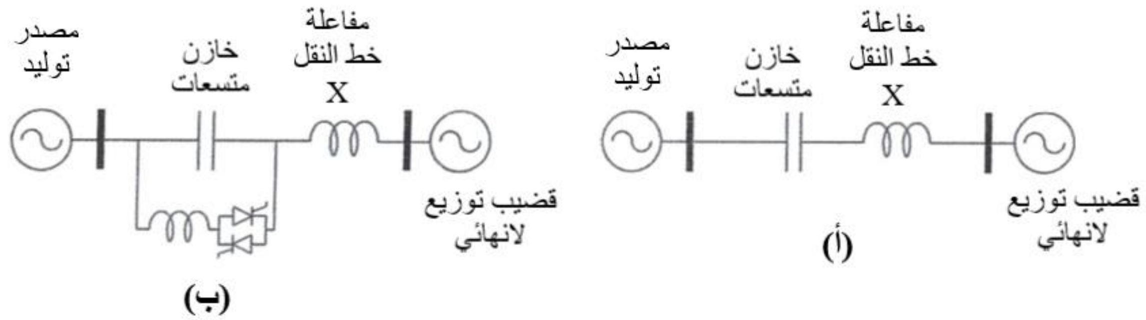
المفاعلة الحثية X المربوطة على التوالي لشبكة النقل والتي هي أحد العوامل المؤثرة في انتقال القدرة والمعطاة في المعادلة $P = \frac{E.V}{X}\sin\delta$ تعد جزء أساس في تحديد حدود الإستقرارية لمنظومة القدرة. لذا فان تقليل مفاعلة العناصر المختلفة لشبكة النقل سوف يساهم مساهمة كبيرة في تحسين الإستقرارية العابرة وذلك بزيادة قدرة التزامن بعد عملية إزالة العطل . والطريق المباشر الذي يتم فيه تحقيق ذلك يكون بتقليل المفاعلات لدوائر النقل نفسها والتي تتضمن تغيير مقدار فولتية النقل وكذلك تغيير اسلوب توزيع الموصلات وعدد الدوائر المستخدمة في النقل التي تربط على التوازي. وهناك طرق إضافية تستخدم أيضاً مثل:

(أ) استخدام محولات ذات مفاعلات تسربية صغيرة .

(ب) استخدام متسعات تعويض تربط على التوالي في خطوط النقل.

تكون قيم المفاعلات التسربية للمحولات عادة تتراوح بين 0.1 إلى 0.15 بنسبة الوحدة للمحولات الجديدة، ويمكن الحصول على أقل قيمة مقبولة للمحولات الإعتيادية باستشارة المصنعين أنفسهم.

المتسعات التي تربط على التوالي مع خط النقل كما مبين في الشكل 11-2 (أ) سوف تقلل من قيمة مفاعلة الخط بصورة مباشرة وبذلك تزداد القدرة القصوى المنتقلة بالخط بصورة ملحوظة ويتم ربط هذه المتسعات على شكل خوازن متسعات Capacitor banks . هذا يعتمد على المعدات التي تستخدم في فصل هذه المتسعات في حالة حدوث عطل وادخالها مرة ثانية عند إزالة العطل.



الشكل 11-2 معوضات قدرة متفاعلة (متسعات) مربوطة على التوالي مع خطوط النقل : (أ) متسعة توالي ثابتة، (ب) متسعة توالي محكومة بالثايرستور (TCSC).

إن طرق إدخال وفصل متسعات التعويض في المنظومات هي طرق متعددة اسهلها استخدام العناصر الألكترونية ذات القدرة العالية مثل الثايرستور كما في الشكل 10-2 (ب) .وتكون السرعة في إدخالها عاملاً مهماً في المحافظة على الإستقرارية العابرة . على أية حال فان التوجه الحديث في استخدام المقاومات المصنوعة من مادة أوكسيد الزنك بادخالها لحظياً هي الطريقة الأفضل.

من مشاكل استخدام متسعات التعويض التي تربط على التوالي مع خطوط النقل هي وجود احتمالية كبيرة لحدوث ظاهرة الرنين ذي الترددات دون الأساسية Sub-harmonics resonance مع المولدات التزامنية التي تعمل بالتوربينات البخارية كمدور أساسي ، هذه المسألة يجب أن تدرس وتحلل بتمعن واهتمام زائد وفي ضوءها تتخذ الإجراءات الوقائية لمنع حدوث مثل هذه الظاهرة المضرة بالمنظومة ككل . بالطبع ستكون مرحلات الحماية المستخدمة لمنع حدوث هذه الظاهرة أكثر تعقيداً.

تقليدياً أستخدمت متسعات التوالي لخطوط النقل الهوائية المعلقة الطويلة جداً ، وحديثاً ظهر أن هذه المتسعات تفيد أكثر في الخطوط القصيرة المحملة بأحمال كبيرة أيضاً . وفي تطبيقات الإستقرارية العابرة فان استخدام متسعات التوالي التي يتم ادخالها عند حدوث العطل وفصلها بعد ازالة العطل تعطي بعض المحاسن ، فعند الكشف عن حدوث عطل أو تأرجح في القدرة عندئذ يتم ادخال هذه المتسعات وفصلها بعد حوالي 0.5 ثانية . وتوضع مثل هذه المتسعات عادة في محطات التحويل الثانوية حيث يمكنها خدمة أكثر من خط نقل واحد.

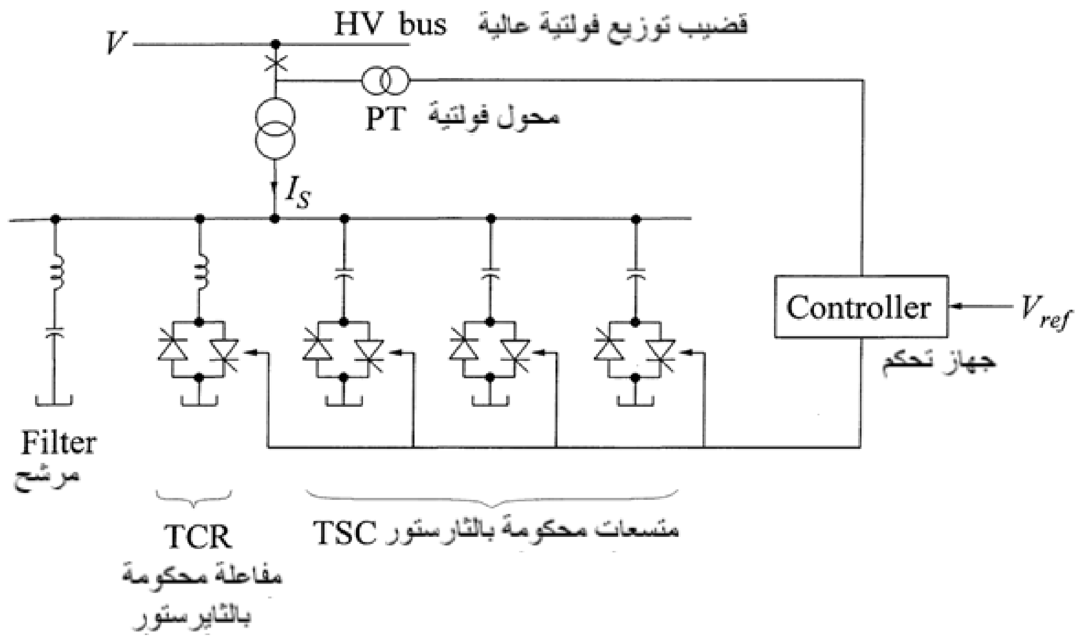
5-11 تعويض التوازي القابل للتنظيم (المنظم) Regulated shunt compensation

لتعويض التوازي المنظم القابلية على المحافظة على قيمة الفولتية في نقاط مختارة من منظومة النقل مما يؤدي إلى تحسين إستقرارية منظومة القدرة بزيادة تدفق قدرة التزامن بين المولدات المربوطة مع بعضها . مثل هذه المعوضات هي المكثفات التزامنية Synchronous condensers ومعوضات القدرة المتفاعلة الستاتيكية Static VAR compensators (SVC) والمفاعلة المحكومة بالثايرستور Thyristor-controlled reactor (TCR) الموضحة أنواعها في الشكل 11-3 وكذلك المعوضات الستاتيكية STATCOM والمعوضات الستاتيكية المرنة E-STATCOM. إن جميع أنواع معوضات التوازي المنظمة هذه تزيد من قابلية انتقال القدرة القصوى لخطوط النقل الطويلة وهذا بالطبع يحسن من إستقرارية الحالة العابرة. و يوضح الشكل 11-4 تفاصيل ربط معوضات التوازي المحكومة بالثايرستور.

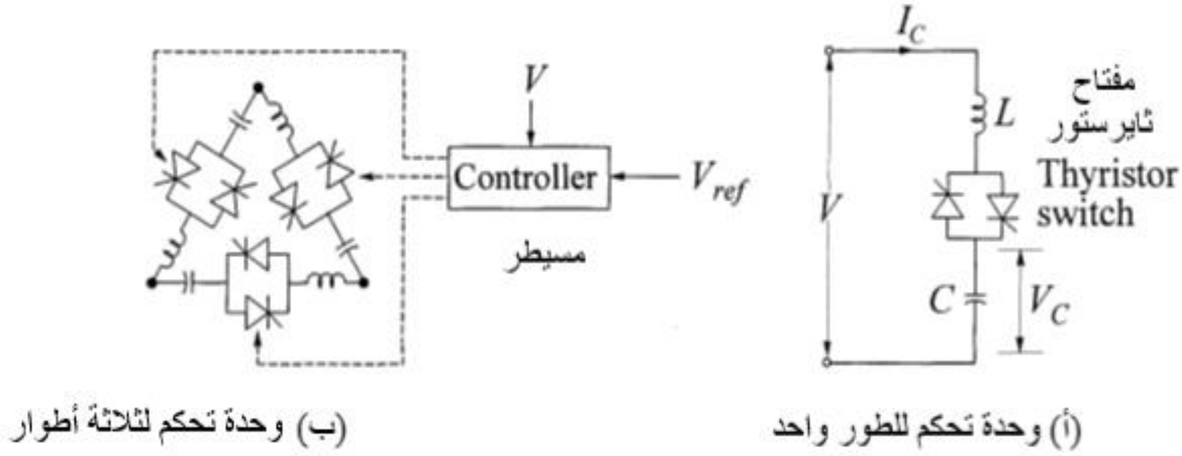
وتجدر الإشارة إلى أن معوضات التوالي والتوازي المحكومة هي جزء من عائلة تسمى بمنظومة نقل التيار المتناوب المرنة Flexible A.C. Transmission System (FACTS).

إذا تم استخدام معوضات التوازي في المنظومة المبينة في الشكل 11-5 وتم وضع هذه المعوضات في نقطة كهربائية في منتصف خط نقل لبيان تأثير معوضات القدرة المتفاعلة على استقرارية المنظومة.

فإذ فرضنا أن فولتيات الأطراف لخط النقل تكون متساوية ، أي أن $E=V_i$ فان وضع معوضات التوازي في منتصف الخط سيؤثر على شكل أو ملامح الفولتية بحيث يجعل $V_m=V_i$ كما في الشكل 11-6 .

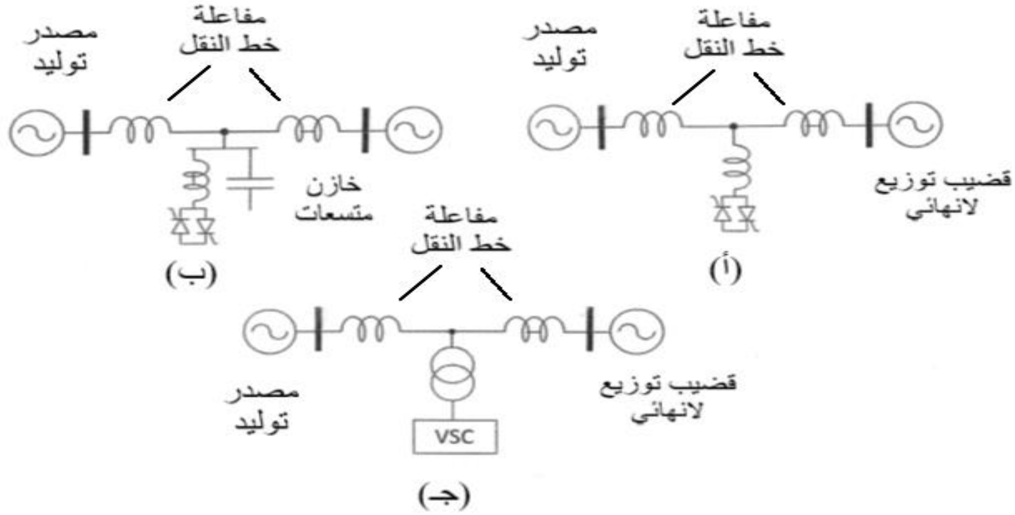


الشكل 11-3 منظومات ستاتيكية نموذجية مستخدمة لتعويض القدرة المتفاعلة .

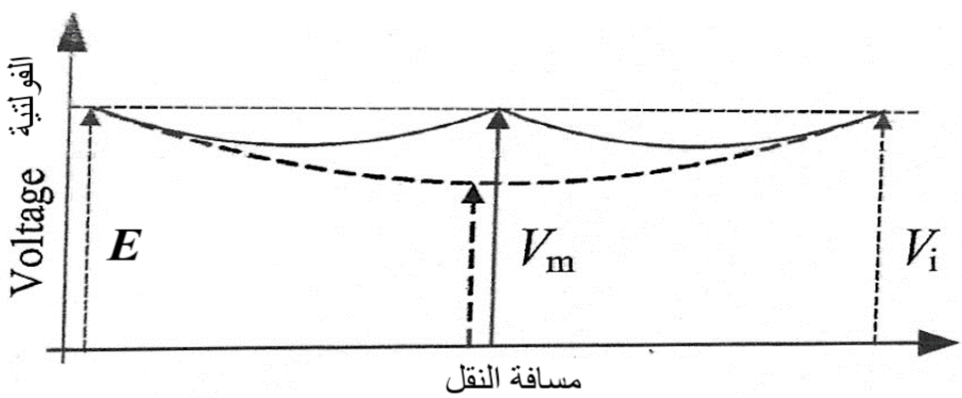


الشكل 11-4 معوضات التوازي الحاوية على وحدات لمتسعات محكومة بالثايرستور

Thyristor Switch Capacitors. (TSC)



الشكل 11-5 معوضات توازي ستاتيكية للقدرة المتفاعلة توضع في منتصف خط النقل : (أ) مفاعلة محكومة بالثايرستور TCR، (ب) متسعة محكومة بالثايرستور SVC ، (جـ) معوض تزامني ستاتيكي SVC .



الشكل11-6 شكل أو ملامح الفولتية على طول خط نقل بعد وضع معوضات قدرة متفاعلة في نقطة تقع في منتصفه (الخط المستمر) ، الخط المتقطع بدونها .

11-6 الإيقاف الديناميكي (الفرملة الديناميكية)

يقصد بالإيقاف الديناميكي أو الفرملة الديناميكية هو تسليط حمل كهربائي اصطناعي على المنظومة خلال فترة الإضطراب العابرة لغرض زيادة القدرة الخارجة P_e للمولدات وبالتالي إلى تخفيض قدرة التسارع للدوار P_{acc} . وأحد أشكال الإيقاف الديناميكي يتضمن إدخال مقاومة كهربائية على التوازي لمدة 0.5 ثانية أثناء حدوث العطل لغرض تخفيض قدرة التسارع لدوار المولدات القريبة من موقع العطل ولتقليل الطاقة الحركية التي يكتسبها الدوار خلال فترة العطل.

طريقة الإيقاف الديمناميكي هذه استخدمت لحد وقت قريب في المحطات الهايدروليكية التي تعمل وحداتها التوليدية بطاقة المياه المخزونة والتي تقع على مسافات بعيدة من مراكز الأحمال. وبالمقارنة بين المحطات الهيدروليكية والمحطات الحرارية فان الأولى تكون أكثر متانة (قوية البنية) لذلك فانها تتحمل الصدمات المفاجئة التي تحدث بسبب إدخال المقاومات لغرض الإيقاف الديناميكي وبدون تأثير شديد على وحدات التوليد. أما تأثير إدخال هذه المقاومات في المحطات الحرارية فيجب الأخذ بعين الإعتبار تأثير الصدمة التي تتولد على محور المدور الأساسي للمولد الذي قد يسبب إجهاد مضر جداً بحيث يسبب في كسر المحور نتيجة الإلتواء الشديد . لذا يجب إدخال المقاومات بصورة تدريجية بثلاث مراحل أو أربعة مراحل متتالية توزع على دورة كاملة واحدة لنمط الإلتواء المنخفض Lower torsional mode .

إن مقاومات الإيقاف الديناميكي موضوعة البحث تم استخدامها بكثرة بربطها على التوازي مع المنظومة ، إلا أنه ظهر بالإمكان ربطها على التوالي للحصول على فعل الإيقاف لأنه في هذه الحالة فان كمية الطاقة المتبددة تتناسب مع تيار المولد وليس مع فولتيته . واحد طرق إدخال المقاومات على التوالي هي باستخدام مقاومات ثلاث تربط بشكل نجمي لتعطي مقاومة ثلاثية الطور تربط مع سلك محايد المولد مع مفتاح تجاوز Bypass switch .

7-11 استخدام المفاعلات

تستخدم المفاعلات Reactors أيضاً لتحسين الإستقرارية العابرة وذلك بربطها على التوازي قرب المولدات حيث تعتبر هذه طريقة بسيطة ومفيدة ويكون ربطها عادة بصورة دائمة في الشبكة ، إلا أنه يجب إخراج هذه المفاعلات بعد حصول العطل مباشرة حيث هذا يحسن أكثر من الإستقرارية.

8-11 استخدام قواطع دائرة تعمل أقطابها بشكل مستقل

يقصد بتشغيل الأقطاب بشكل مستقل هو أن قاطع الدائرة يحتوي على آلية (ميكانيكية) منفصلة لكل طور من الأطوار الثلاثة بحيث أن كل طور يغلق ويفتح بصورة مستقلة عن الطورين الآخرين . نتيجة لذلك فان حدوث فشل في اشتغال أحد الأقطاب سوف لا يؤثر على اشتغال القطبين الآخرين. لكنه مع أن أقطاب القاطع الثلاثة يعملون بصورة مستقلة بعضهم عن بعض فان جهاز الحماية ينظم في العادة لكي يفصل الأقطاب الثلاثة مع بعضها لأي نوع من انواع العطل إن تطلب ذلك.

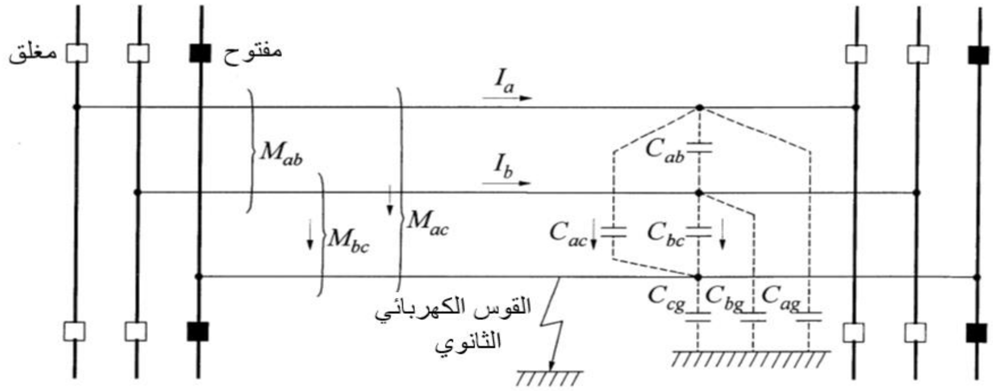
إن خاصية عمل الأقطاب بصورة مستقلة للقواطع يمكن أن تستخدم لتحسين استقرارية منظومة القدرة العابرة حيث أن عملية فصل الأطوار الثلاثة مرة واحدة عند حدوث عطل سيؤدي إلى تدهور استقرارية المنظومة وخاصة الحالة عندما يحصل عطل على طور واحد ويبقى الطورين الآخرين سليمين . لذا فمن الممكن استخدام القواطع التي تعمل أقطابها بشكل مستقل لفصل الطور المعرض للعطل فقط والإبقاء على

الطورين السليمين في حالة إشتغال تام. وإذا كان العطل من نوع طور واحد إلى الأرض فان جهاز الحماية ينظم لكي يفصل الطور المتعرض للعطل فقط ويتم إعادة توصيله بحدود 0.5 إلى 1.5 ثانية . أما إذا حدث عطل متعدد الأطوار فان القاطع سوف يفصل الأطوار الثلاثة جميعها . وخلال الفترة التي يكون فيها أحد الأطوار المعرض للعطل ، فان القدرة سوف تنتقل عن طريق الطورين السليمين.

ولما كانت أكثر الأعطال التي تحدث على خطوط النقل الهوائية المعلقة هي من نوع طور واحد إلى الأرض فان عملية فصل الطور الواحد المتعرض للعطل وإعادة توصيله بسرعة بعد زوال العطل سوف يحسن كثيراً من استقرية المنظومة ، وهذا يكون أفضل بكثير من فصل الأطوار الثلاثة كلها وإعادة ربطها. كذلك فان عملية فصل طور واحد وإعادة غلقه لا تخلو من مخاطر حيث قد تحدث المشاكل التالية نتيجة لذلك:

- تجديد اشتعال القوس الكهربائي في أقطاب القاطع مرة ثانية
- حدوث إجهاد إلتواء مضر على محور التدوير للمولدات وكذلك على ريش التوربين البخاري نفسه
- التأثير الحراري وزيادة تسخين ملفات الساكن للمولدات القريبة بسبب حدوث تيارات التتابع السالب

فعندما يتم فصل خط واحد من خط نقل ثلاثي الطور وذلك بفتح طرفي الخط كما في الشكل 10-7 فان هذا الطور المفتوح سوف يحصل فيه تقارن سعوي وتقارن حثي مع الخطين السليمين اللذين يكونان في حالة اشتغال تام وينقلان الطاقة . في هذه الحالة سوف تحتث فولتية في الطور المفتوح نفسه بسبب التقارن السعوي الذي يكون له تأثير ملحوظ. أما التقارن الحثي فيكون تأثيره أقل بكثير . هذه الفولتية المحتثة نتيجة التقارن السعوي تكون دالة مباشرة لقيم المتسعات بين الطورين السليمين والطور المفتوح إلى الآرض حيث تعمل هذه الفولتية على إعادة اشعال القوس الكهربائي في قطب القاطع للطور المفتوح بعد أن قد تم اطفائه قبل لحظات. ويعتمد اشتعال القوس مرة ثانية على موقع العطل وطول الخط نفسه.



الشكل 11 -7   الإشتعال الثاني (إعادة الإشتعال) للقوس الكهربائي في قواطع الدائرة.

بالنسبة للمشكلة الثانية وهي المتعلقة بالإجهاد الإلتوائي الذي يحصل على محور التدوير للمولدات التوربينية نتيجة فتح فصل طور واحد فقط وإعادة غلقه فان هذه العملية تؤدي لحصول اضطرابات متتابعة على محور التوربين ، حيث أن الإضطراب الأول يحدث بسبب العطل نفسه والذي يكون أقل شدة إذا كان العطل من نوع عطل طور واحد إلى الأرض. وعندما تتم إزالة العطل بفتح الخط يحدث حينئذ الإضطراب الثاني ، وعملية إعادة هذا الخط للخدمة إما أن تكون ناجحة أو تكون فاشلة مما تؤدي إلى إضطراب آخر إضافي . عليه فان محور التدوير سيتعرض إلى تذبذبات إجهادية نتيجة الدفعات المتعاقبة التي يكون تأثيرها تقوية العزم العابر على محور التدوير. إن تكرار مثل هذه الأحداث تجهد محور التدوير وتؤثر أيضاً على ريش التوربين ولو أن بعض الدراسات الحديثة أظهرت ضعف تأثير فصل طور واحد وإعادة ربطه على إجهاد محور التدوير وكذلك على ريش التوربين . على أية حال فمن الحكمة أن يتم إجراء دراسات بصورة منفردة قبل الشروع بتطبيقها عملياً.

أما المعضلة الثالثة الخاصة بتأثير الدورة الحرارية على المولدات القريبة عندما يتم فصل طور واحد والناجمة عن تيارات التتابع السالب التي تمر في سواكن المولدات القريبة وكذلك التي تمر في المكثفات التزامنية فان تيارات التتابع السالب هذه والذي تكون قيمة ترددها 100 هرتز سوف تقوم بفعل تسخين الملفات وتولد حرارة غير مرغوب بها. وقد وضعت الأنظمة القياسية الدولية تعاريف وحدود لقابلية تحمل المولدات للتيار غير المتوازن سواء كان هذا التيار يحدث لفترة قصيرة أو يكون مستمراً. فبالنسبة لقابلية تحمل التيار غير المتوازن للفترة القصيرة فيعبر عنها بدلالة I_2^2t وهو حاصل الضرب التجمعي لتيار التتابع السالب لكل ماكنة (I_2) مع الزمن (t). والقيم المسموح بها تعتمد على نوع الماكنة وهي كما معطاة في الجدول 11 -1.

الجدول 11-1 القيم المسموحة للتيار غي المتوازن للفترة القصيرة .

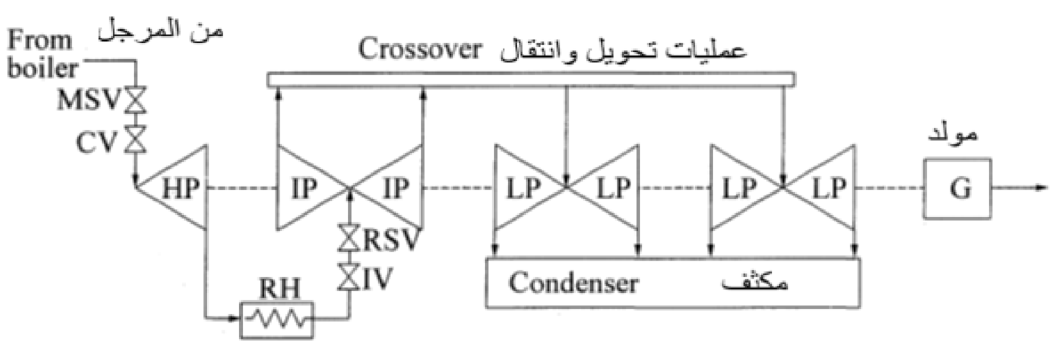
نوع الماكنة	قيمة I_2^2t المسوح بها
مولد بارز القطب	40
مكثف تزاميني	30
مولد ذو دوار اسطواني :	
• **تبريد غير مباشر**	30
• **تبريد مباشر (لحد 800 ميجاواط)**	10
• **تبريد مباشر (800 إلى1600 ميجاواط)**	I0-[(MVA -800)x0.00625]

9-11 الإغلاق والفتح السريع للصمامات

إحدى الطرق المستخدمة التي تساعد في تحسين استقرارية منظومات القدرة هي تقنية التحكم بصمامات البخار في وحدات التوليد الحرارية والتي تسمى بالفتح والإغلاق السريع للصمامات Fast Valving . وتعتمد هذه الطريقة على مبدأ تخفيض قدرة التسارع (التعجيل) للمولدات التي تتبع حصول عطل شديد في منظومة النقل وذلك بالإغلاق والفتح السريع لصمامات البخار بصورة مدروسة ومنظمة.

ومع أن استخدام مبدأ الإغلاق والفتح السريع لصمامات البخار كوسيلة لتحسين الإستقرارية ظهرت في الثلاثينيات من القرن الماضي إلا أن تطبيق هذه الطريقة لم تلق اهتماماً واسعاً في الحياة العملية لأسباب عديدة . من أحد هذه الأسباب هو ما يتعلق بحصول تأثيرات قاسية على التوربين البخاري نفسه وبالأخص على منظومة الإمداد بالطاقة .إلا أنه في منتصف الثمانينيات من القرن الماضي أدركت شركات انتاج الطاقة إن الغلق والفتح السريع للصمامات قد تكون طريقة فعالة لتحسين استقرارية المنظومة في بعض الحالات المتطرفة حيث تم تقييم وفحص استخدام هذه الطريقة بنجاح من قبل شركات معروفة لإنتاج الطاقة.

ولشرح مبدأ عمل طريقة الإغلاق والفتح السريع للصمامات لنتأمل وحدة توليد تعمل بالوقود الأحفوري (مشتقات النفط أو الغاز) التي تحتوي على توربين مفرد من النوع الذي يعيد عملية تسخين البخار الذي يطلق عليه بالتوربين "الترادفي المركب " "Tandom-compound" المبين تفاصيل تركيبه في الشكل 11-8. تتضمن هذه الوحدة التوليدية صمامات تحكم Control valves (CVs) وصمامات اعتراضية لإعادة التسخين Intercept Valves (IVs) ، هذه الصمامات تؤمن وسائل مفيدة للتحكم في القدرة الميكانيكية للتوربين . واعتماداً على كيفية استخدام هذه الصمامات في السيطرة على تدفق البخار فقد اعتمدت اساليب مختلفة لاستخدام طرق الإغلاق والفتح السريع للصمامات المذكورة.



HP = ضغط عالي (توربين)	RH = إعادة تسخين البخار	CV = صمام تحكم
IP = ضغط متوسط (توربين)	MSV = صمام (دخول) أمان رئيسي	IV = صمام اعتراضي
LP = ضغط منخفض (توربين)	RSV = صمام أمان لإعادة تسخين البخار	

الشكل11-8 توربين بخاري من نوع الترادفي المركب المعيد لتسخين البخار الذي يعمل بالوقود الأحفوري.

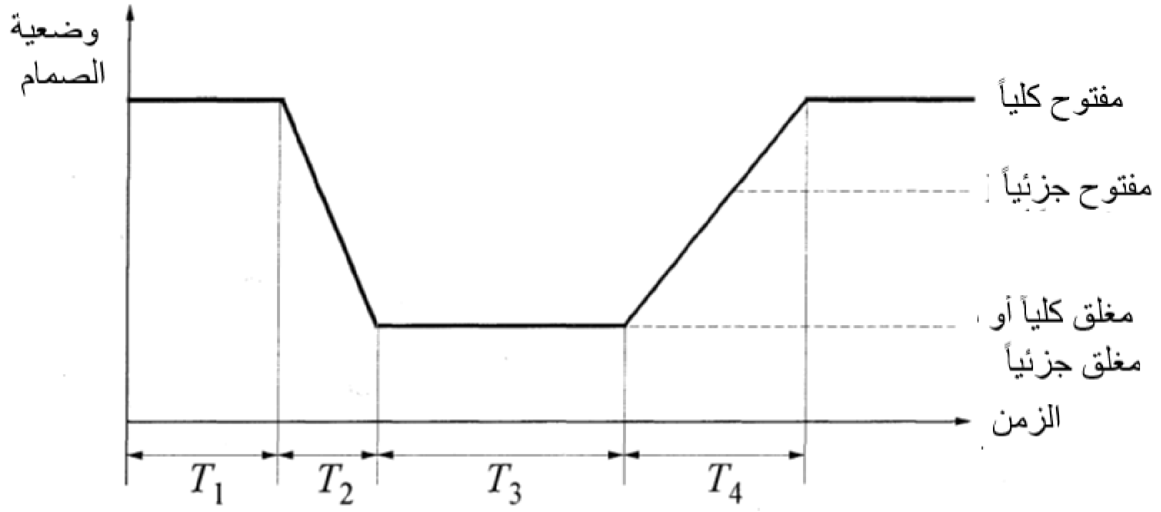
في تصاميم التوربينات التي تستخدم غالباً هي التي تكون من النوع الذي يتم فيه إغلاق الصمامات الإعتراضية (IV) بسرعة وبعدها يفتح كاملاً بعد وقت قصير. وحيث أن الصمامات الإعتراضية تتحكم بما يقرب من 70% من قدرة وحدة التوليد الكلية فان هذا التصميم يعطي تخفيضاً مناسباً وملحوضاً لقدرة التوربين. كذلك يمكن أيضاً تخفيض قدرة التوربين أكثر من خلال تحفيز عمل صمامات التحكم (CVs) والصمامات الإعتراضية (IVs) كليهما في الوقت نفسه.

إن طريقة الإغلاق السريع التي يتبعها الفتح الكامل للصمامات تسمى بـ " الغلق والفتح اللحظي للصمامات" ؛ هذه الطريقة تساعد على تحسين الإستقرارية للمنظومة وتستخدم بعد حصول عطل شديد وذلك لتخفيض القدرة الميكانيكية للتوربين. عموماً فقد وُجِد بأن طريقة الإغلاق والفتح السريع للصمامات هي طريقة بسيطة وفعالة لتلبية حاجات اشتغال منظومة القدرة وتحسين أداءها الذي يتطلب تصميمها وعملها إستقرارية جيدة بعد حصول عطل ثلاثي الطور الذي تتم إزالته بوقت متأخر بسبب عدم الإستجابة السريعة لقاطع الدائرة حيث أن مشاكل الإستقرارية العابرة في مثل هذه الحالة يصاحبها غالباً نمط التأرجح في محطة التوليد وقد يستغرق زمن التأرجح هذا من 0.5 ثانية إلى 1.2 ثانية.

تكون عادة كلفة استخدام طريقة الإغلاق والفتح السريع للصمامات منخفظة ، إلا انه بالنظر للمخاوف من استعمالها التي تكمن في احتمال حصول تأثيرات قاسية على التوربين وعلى مراجل البخار وكذلك على المولد نفسه فان هذا الطريقة لا يفضل استخدامها إلا في الحالات التي لايمكن استخدام الطرق والتدابير الأقل قساوة لضمان استقرارية المنظومة . وفي مثل هذه الأحوال فان الطريقة الأخرى هي القيام بفصل وحدة التوليد عن الخدمة Generator Tripping . وبالمقارنة بين طريقة فصل المولد وطريقة الإغلاق والفتح السريع للصمامات فإن الأخيرة لها محاسن كون أن وحدة التوليد تبقى مربوطة إلى المنظومة وبذلك لايتم حصول انخفاض في قيمة القصور الذاتي لها بحيث تتم استعادة القدرة الخارجة بصورة كلية أو جزئية خلال بضع ثواني، إضافة لذلك فان الإجهاد الحاصل على محور التدوير يعتقد بانه يكون إقل قساوة . على أية حال فان طريقة الإغلاق والفتح السريع للصمامات هي غير فعالة للمساعدة في الإستقرارية كما هي طريقة فصل المولد .

بالنسبة إلى العمليات المنطقية لتشغيل الإغلاق والفتح للصمامات فقد تجرى باشكال مختلفة إعتماداً على الشركات الصانعة والغرض من استخدامها ، لكنه بصورة عامة فان العمليات المنطقية هذه تتضمن دائرتين اثنتين ، أحدهما لتوليد الترتيب التسلسلي الزمني لصمام التحكم (CV) والأخرى لتوليد إشارة التفريغ إذا تطلب الأمر أن تتبع عملية إغلاق وفتح الصمامات تخفيض القدرة الخارجة للمولد. إن الترتيب الزمني التسلسلي لتشغيل صمام التحكم يتضمن توليد إشارة لإقفال الصمامات بمعدل وبنسبة يتم ضبطها مسبقاً كما مبين في الشكل 11-9 الذي يعطي نموذجاً قياسياً للترتيب الزمني التسلسلي للإغلاق والفتح

للصمامات . وتجدر الإشارة إلى أن الأزمان المسموح بها لتفعيل الصمامات قد تتأثر بواسطة المعدات العاملة والأمور الأخرى التي يجب أن تؤخذ بعين الإعتبار للمنظومة نفسها.



الشكل 11-9 ترتيب زمني نموجي لتسلسل الإغلاق والفتح للصمامات.

T_1 = زمن التأخير لبدء عملية الإغلاق الكامل للصمام.

T_2 = زمن إغلاق الصمام.

T_3 = الزمن الذي يبقى فيه الصمام مغلقاً بصورة كاملة.

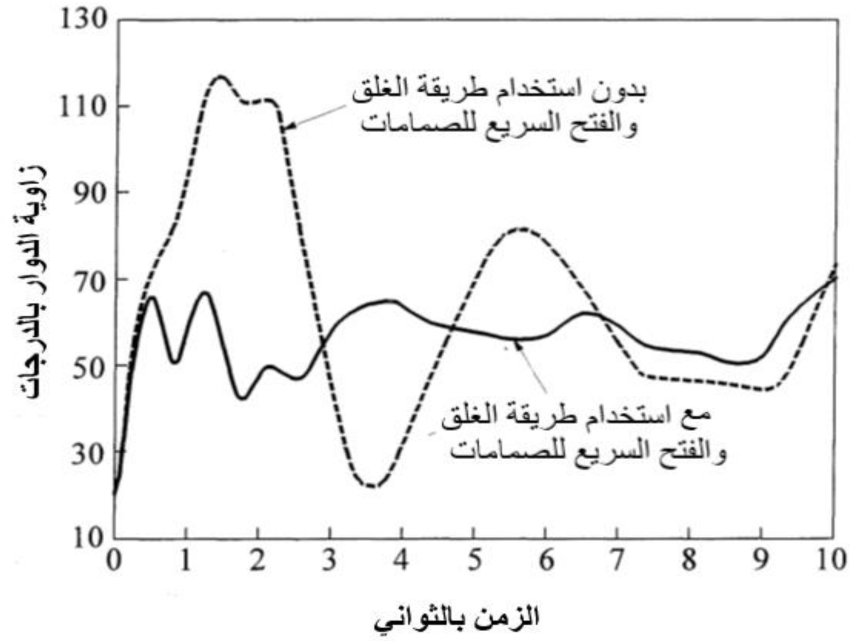
T_4 = زمن فتح الصمام.

إن قابلية الصمام على الإغلاق والفتح السريع يعتمد على منظومة التحكم الألكترونية للتوربين خاصة التوربينات التي تعمل بطاقة المياه . ومنظومة التحكم هذه يستخدم فيها نبائط أنصاف الموصلات ذات القدرة العالية مثل الثايرستورات ، وكذلك فان منظومة التحفيز الهيدروليكية ذات الضغط العالي يجب تكون قادرة على إعطاء تحكم سريع بحيث يكون زمن الإقفال في هذه المنظومات بحدود من 0.08 ثانية إلى 0.4 ثانية .

أما بخصوص وحدات التوليد الحرارية فان استخدام طريقة الغلق والفتح السريع للصمامات تحسن من إستقرارية المنظومة كثيراً ويوضح الشكل 11-10 استجابة منظومة القدرة لتحسين استقراريتها باستخدام طريقة الغلق والفتح للصمامات وبدونها، حيث تم تطبيقها على محطة توليد تحتوي على وحدتي توليد قدرة كل منهما 500 ميجاواط تعمل هذه الوحدات بالوقود الأحفوري وقد أعتبر في هذه الحالة أن الترتيب الزمني التسلسلي للإغلاق والفتح السريع للصمامات بفرض إغلاق وفتح كامل للصمامات الإعتراضية فقط وبأزمان كالآتي:

$T_1 = 0.1$ ثانية ، $T_2 = 0.25$ ثانية ، $T_3 = 0.1$ ثانية ، $T_4 = 0.85$. وتية

وافترض أيضاً أن الوحدات لها منظومات إثارة مغناطيسية ألكترونية تعمل بالثايرستورات وكذلك تمتلك منظومة لتثبيت القدرة الكهربائية الخارجة ، وافترض أيضاً أن الإضطراب الحاصل سببه عطل ثلاثي الطور على خط نقل كبير قريب من المحطة وقد تم إزالته بزمن مقداره 60 ثانية بواسطة وسائل الحماية.



الشكل 11-10 تأثير طريقة الغلق والفتح السريع للصمامات على استقرارية محطة توليد حرارية تعمل بالوقود الأحفوري.

10-11 طريقة فصل المولد Generator Tripping

استخدمت طريقة فصل وحدات التوليد الإنتقائي عند حدوث إحتقانات شديدة وطارئة في منظومة النقل كأحد طرق تحسين استقرارية منظومة القدرة لسنوات عدة. إن عملية رفض أو فصل التوليد في مواقع مناسبة ومعينة في المنظومة يقلل من القدرة المنتقلة خلال خطوط النقل المعرضة للحالات الحرجة والطارئة. ولما كانت عملية فصل التوليد هي عملية سهلة وسريعة لذلك اعتبرت هذه الطريقة وسيلة فعالة وسريعة لتحسين الإستقرارية العابرة.

تأريخياً ، كانت طريقة فصل المولد للمساعدة في تحسين الإستقرارية محصورإستخدامها فقط في المحطات التي تعمل بطاقة المياه كون أن هذه المحطات تنشأ عادة بعيدة عن مراكز الأحمال والمدن حيث يكون تأثير الخطر الناشئ عن فصل المولدات المفاجئ أقل ما يمكن. ومنذ السبعينيات من القرن الماضي

إنتشرت هذه الطريقة بصورة تدريجية في المحطات الحرارية والمحطات النووية كوسيلة سهلة لحل مشاكل الإستقرارية القاسية.

عند الشروع في فصل وحدة التوليد يجب مرور هذه الوحدة في سلسلة من الإجراءات النظامية القياسية لعملية فصلها وإعادة تشغيلها مرة ثانية . في هذه الحالة قد يتم قطع امدادات القدرة الكهربائية عن المستهلكين لساعات عديدة . ومن الإجراءات العملية التي تستخدمها شركات انتاج وتوزيع الطاقة الكهربائية هي استخدام وحدات توليد حرارية سريعة يجري تشغيلها لتغذية المعدات والأجهزة المساعدة والملحقة بالوحدات الرئيسية ولتعويض جزء من الطاقة المفقودة لحين إعادة وحدات التوليد الكبيرة إلى الخدمة.

أما سلسلة الأحداث التي تتبع عملية فصل المولد فتكون :

- فصل مرجل تسخين البخار،
- تحفيز أجهزة السيطرة على التوربين لغرض التحكم في سرعته لكيلا تصبح سرعته عالية أكثر من المطلوب وتحديدها ضمن القيم الإعتيادية تقريباً (في هذه الحالة لايتم فصل التوربين نهائياً).

في حالة فصل وحدة التوليد عن المنظومة فإما أن تبقى تعمل بدون حمل (حالة اللاحمل) أوأن تبقى لتغذية المعدات والأجهزة الملحقة الضرورية لعملها. ويفضل بعد ذلك إجراء تنظيف سريع للمرجل وإعادة إشعاله مرة أخرى.

من المعروف بصورة جلية أن عملية فصل وحدة التوليد المفاجئ يعرضها إلى تغييرات مفاجئة في التحميل الكهربائي والتحميل الميكانيكي مصحوبة بتأثيرات على كل من المولد نفسه وكذلك على المدور الأساسي وعلى منظومة تجهيز الطاقة. ولما كانت وحدة التوليد الحرارية وأجهزة التحكم والسيطرة التابعة لها مصممة جميعها لكي تتحمل مثل هذه الصدمات فإن هناك احتمال عدم اشتغال أجهزة السيطرة بصورة صحيحة . كذلك فان تصميم الوحدات الحرارية لا تصمم عادة للعمل في ظروف يتم فصل الأحمال عليها بصورة متكررة. وفي حالة تكرار مثل هذه الحالة يجب زيادة فترات عمل الصيانة الوقائية لها . على هذا الأساس فان طريقة فصل المولد لغرض تحسين الإستقرارية يفضل عدم استخدامها بكثرة إلا في حالات الضرورة القصوى.

في أدناه بعض الأمور التي تحصل عند استخدام طريقة فصل المولد:

(أ) السرعة العالية الناجمة عن فصل المولد

(ب) الإجهادات الحرارية المتسببة عن التغير السريع في الأحمال

(ت) نشوء عزوم ميكانيكية عالية المستوى على محور التدوير نتيجة الأضطرابات المتتابعة .

11-11 طريقة تجزأة وفصل المنظومة المتحكم بها واسقاط بعض الأحمال

إن طريقة تجزأة وفصل المنظومة بطريقة مسيطرعليها قد تستخدم لمنع انتشار اضطراب كبير في جزء من منظومة كبيرة مترابطة فيما بينها من الإنتشار إلى الأجزاء الأخرى والذي قد يؤدي إلى انهيار بشكل كبير . هذا الإضطراب قد يحدث نتيجة فقدان خطوط نقل كبيرة ورئيسية تحمل كميات كبيرة من القدرة الكهربائية أو فقدان كمية كبيرة من التوليد. وتكون بداية عدم الإستقرية في مثل هذه الحالات في صيغة تغييرات فجائية في الخطوط البينية الرابطة لأجزاء المنظومة. وإذا تم الكشف على مثل هذه الحالة في وقت مبكر واستعملت المعلومات الخاصة بها للشروع في اتخاذ الإجراءات الواقية فان هذا يجنب المنظومة تعرضها لإعتلال وارباك شديدين .

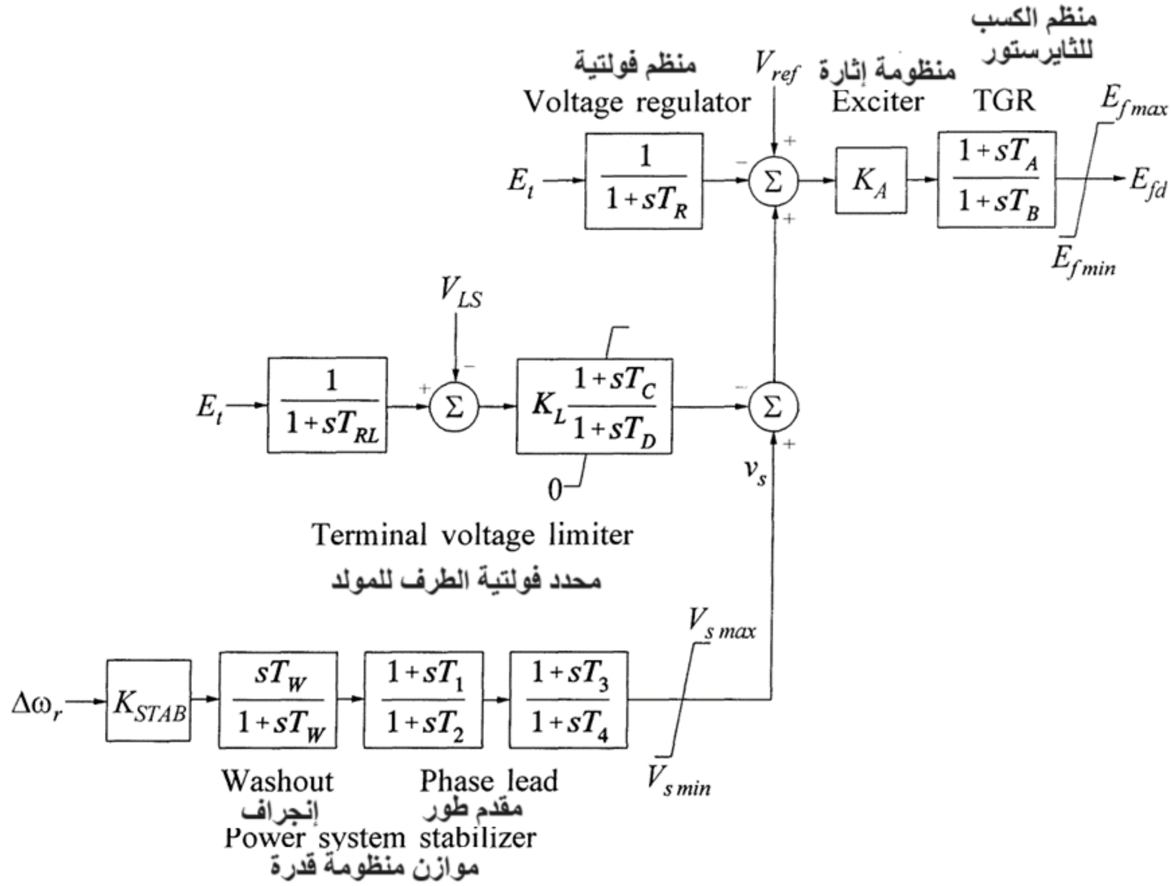
12-11 استخدام منظومة الإثارة المغناطيسية ذات السرعة العالية

من الممكن الحصول على تحسين الإستقرارية العابرة من خلال الزيادة السريعة والوقتية للإثارة المغناطيسية للمولد حيث يتم ذلك بزيادة فولتية المجال المغناطيسي خلال فترة الإضطراب الوقتية وهذه الزيادة في الفولتية الداخلية للماكنة ستزيد من توليد قدرة التزامن .

خلال فترة الإضطراب العابر الناجم عن عطل في منظومة النقل وعن عملية إزالة العطل التي يتبعها عزل العنصر الذي تعرض للعطل فان الفولتية على أطراف المولد ستنخفض بصورة ملحوظة. في هذه الحالة سيقوم منظم الفولتية التلقائي Automatic Voltage Regulator (AVR) بالإستجابة السريعة لهذه الحالة وذلك بزيادة فولتية المجال للمولد وهذا له تأثير مفيد لتحسين الإستقرارية العابرة. ويعتمد التأثيرالذي يحصل من استخدام هذا النوع من التحكم الذاتي على قابلية منظومة الإثارة لزيادة فولتية المجال بالسرعة المطلوبة لوصولها إلى أعلى قيمة ممكنة. ومنظومات الإثارة السريعة ذات أعلى إستجابة أولية التي تعطي أعلى سقف للفولتية تكون هي المطلوبة في مثل هذه التطبيقات . السقف العالي للفولتية يحدد بقابلية عازل ملفات المجال في دوار المولد على تحمله ، ففي وحدات التوليد الحرارية يحدد هذا السقف بحوالي ثلاث مرات بقدر قيمة فولتية المجال المقررة.

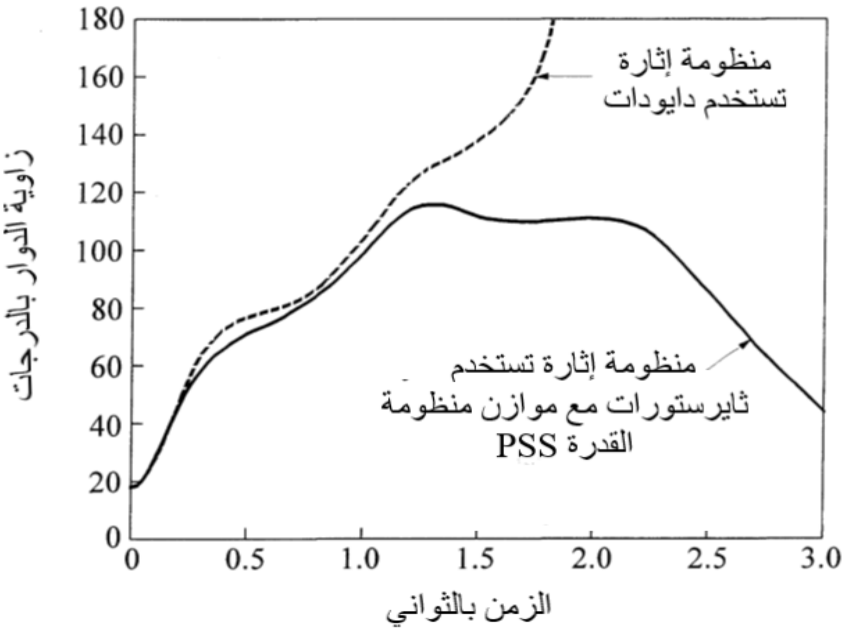
قد يؤدي استخدام منظومات الإثارة السريعة لتحسين الإستقرارية العابرة إلى توهين عملية إخماد التذبذبات التي تحصل في محطة التوليد نفسها . لذلك ولمعالجة هذا الأمر يستخدم متحكم تلقائي إضافي للإثارة يسمى بـ "موازن منظومة القدرة Power System Stabilizer (PSS) " الذي يؤمن وسيلة جيدة لإخماد تذبذبات المنظومة وبذلك يساعد في استخدام استخدام منظومات الإثارة السريعة المذكورة. لقد وجد بأن استخدام منظومات الإثارة السريعة ذات الإستجابة الأولية العالية سوية مع موازنات منظومة القدرة هي الطريقة الأكثر فاعلية وأكثر اقتصادية لتحسين استقرارية المنظومة بصورة كلية . ومثال على ذلك

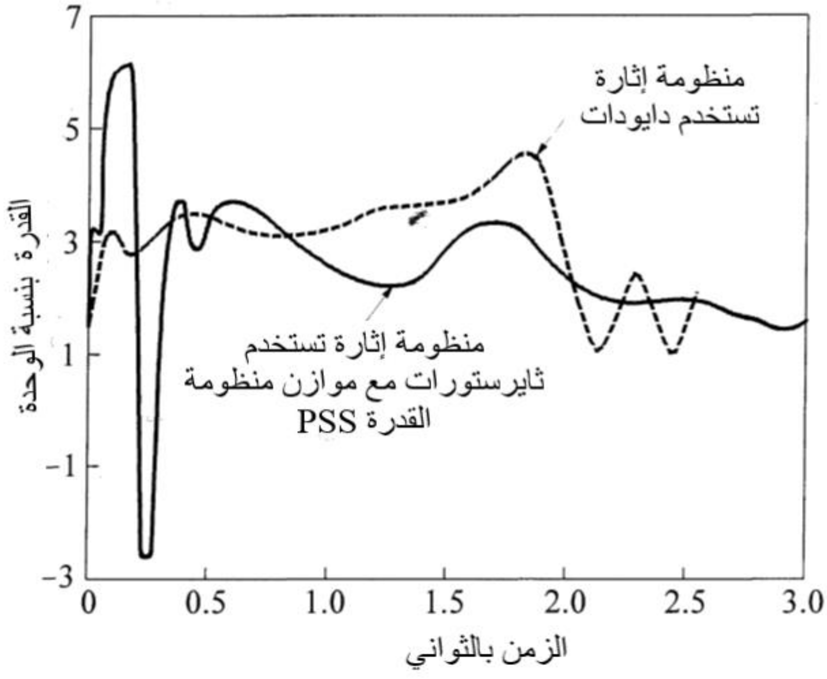
يبين الشكل 11-11 مخطط كتلي يمثل منظومة إثارة تستخدم الثايرستور مع منظم فولتية تلقائي (AVR) وموازن منظومة القدرة (PSS) مع محدد لفولتية الطرف . وظيفة محدد الفولتية هو لمنع الفولتية من الزيادة عن قيمة تضبط مسبقاً بحوالي 1.15 بنسبة الوحدة عادة. ويعتمد تأثير منظومة الإثارة في تحسين استقرارية المنظومة على تصميم منظومة السيطرة والتحكم الجيدة والتناغم الجيد فيما بين عناصرها.



الشكل 11-11 مخطط كتلي لمنظومة إثارة تستخدم الثايرستور مع موازن منظومة قدرة PSS.

إن تأثير إستجابة منظومة الإثارة على الإستقرارية العابرة موضح في الشكل 11-12حيث يقارن هذا الشكل الاستجابة لمحطة توليد حرارية في حالة (أ) استخدام منظومة إثارة تستخدم الدايود (الثنائي) ، وبين المحطة نفسها عندما (ب) تستخدم منظومة إثارة تشتغل بالثايرستور مع موازن منظومة قدرة PSS. تم في هذه الحالات أخذ الإضطراب كونه ناجم عن عطل ثلاثي الطورعلى خط نقل رئيسي بالقرب من أطراف المحطة وقد افترض أيضاً ان العطل تمت إزالته خلال 60 ملي ثانية. لقد ظهر بأن المنظومة تكون غير مستقرة باستخدام منظومة الإثارة الدوارة (باستخدام الدايودات) بينما تكون مستقرة تماما باستخدام منظومات الإثارة السريعة ذات الإستجابة الأولية العالية العاملة بالثايرستور.





الشكل 11-12 مقارنة للإستقرارية العابرة باستخدام منظومة إثارة بتيار متناوب تستخدم دايودات ومنظومة إثارة تستخدم ثايرستورات.

الملحق 1

نظام نسبة الوحده THE PER-UNIT SYSTEM

يعبر نظام نسبة الوحدة عن الفولتيات والتيارات والقدرات والممانعات والكميات الكهربائية الأخرى بالمعادلة التالية :

$$\text{القيمة بنسبة الوحدة} = \frac{\text{القيمة الحقيقية}}{\text{القيمة الأساس}}$$

$$\boldsymbol{Quantity\ per\ unit\ (pu)} = \frac{\boldsymbol{Actual\ value}}{\boldsymbol{Base\ value}}$$

على هذا الأساس فان قيمة نسبة الوحدة لأية كمية تعرف بأنها النسبة لتلك الكمية إلى قيمة كيفية يتم أختيارها بحيث تمتلك الأبعاد نفسها وتدعى بالقيمة الأساس . لذا فأن قيمة نسبة الوحدة تكون بلا أبعاد. ويشار إلى القيم الأساس بالرمز السفلي *base* أو اختصاراً بالرمز السفلي b وقيم نسبة الوحدة بالرمز السفلي . *p.u*. بصورة عامة يتم إختيار كميتين اثنين كأساس بصورة كيفيية مثل الفولتية والقدرة وتحسب الكميات الأخرى من هاتين الكميتين الأساس.

نفرض أن $V_{base} = V_{rated}$ و $S_{base} = S_{rated}$

بعدها يتم حساب الكميات الأخرى من هاتين القيمتين المختارتين كالآتي:

التيار الأساس : $I_{base} = \dfrac{S_{base}}{V_{base}} = \dfrac{V_{base}}{Z_{base}}$

الممانعة الأساس : $Z_{base} = \dfrac{V_{base}}{I_{base}} = \dfrac{(V)^2_{base}}{S_{base}}$

وتكون القيم بنسبة الوحدة كما يأتي :

$$V_{p.u.} = \frac{V_{actual}}{V_{base}} \quad ، \quad I_{p.u.} = \frac{I_{actual}}{I_{base}} \quad ، \quad S_{p.u.} = \frac{S_{actual}}{S_{base}} \quad ، \quad Z_{p.u.} = \frac{Z_{actual}}{Z_{base}}$$

اذا كان لدينا مصدر كهربائي أحادي الطور فولتيته V يجهز تيار مقداره I أمبير إلى حمل ممانعته Z أوم واختيرت V_b فولت للسهولة بوصفها القيمة الاساس للفولتية ، فأن قيمة نسبة الوحدة لفولتية المصدرتكون $V_{pu} = V/V_b$ وبالأسلوب نفسه قد يمثل تيار المصدر بنظام نسبة الوحدة بكونه

$I_{pu} = I/I_b$. عليه تكون هناك ممانعة أساس $Z_b = V_b/I_b$ أوم . وبتطبيق نظام نسبة الوحدة على المانعة ،

$$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_b} = \frac{V/I}{V_b/I_b} = \frac{V/V_b}{I/I_b} = \frac{V_{pu}}{I_{pu}} \qquad [1.1م]$$

لذلك فأن قيمة نسبة الوحدة تخضع لقانون أوم (لذلك تخضع أيضاً لقوانين الشبكات الاخرى جميعها) .

إن قيمة 1.0 بنسبة الوحدة لأية كمية تساوي القيمة الأساس لتلك الكمية . وعليه تكون قيم نسبة الوحدة منسوبة إلى القيمة 1.0 حصراً ؛ وعند ضرب قيم نسبة الوحدة بالعدد 100 فسوف تعطي القيم بالنسبة المنوية (%) والتي تكون منسوبة إلى العدد 100 . على القارئ هنا أن يفهم أن قانون أوم لا يكون صحيحا في نظام النسبة المئوية للوحدات . لهذا السبب فان أية بيانات معطاة لمنظومة قدرة بنظام النسبة المئوية من المستحسن تحويلها إلى نظام نسبة الوحدة قبل الشروع بعمل أية حسابات لازمة . إن أختيار قيم الأساس يكون كيفياً ويكون من الوضوح بحيث لايمكنه التأثير على النتائج النهائية لأية مسألة معينة. بما أن $Z_b = V_b/I_b$ أوم فان أثنتان من هذه القيم الثلاث فقط يمكن أختيارها كيفيا علاوة على ذلك فأن هذا الأختيارمن شأنه أن يثبت قيمة القدرة الظاهرية أو الفولت - امبير الأساس $S_b = V_b I_b$ (وعليه تثبت القدرة الفعالة والقدرة المتفاعلة ايضاً). وقيمة الفولت - أمبير هذه يمكن معالجتها فنياً بنظام نسبة الوحدة حيث أن

$$S_{pu} = \frac{S}{S_b} = \frac{VI^*}{V_b I_b} = V_{pu} I_{pu}^* \qquad [1.2م]$$

والسبب في استخدام مترافق التيار I^* في [م 1.2] مبين في الملحق3 .

بصورة عامة يمكن تمثيل الكميات V, I, Z, S الأصلية بأعداد مركبة لها زوايا طور؛ ومن المفروض بنظام نسبة الوحدة أن يحافظ على زوايا الطور هذه . عليه فأنه من الضروري الفهم أن جميع قيم الأساس تكون كميات قياسية ليست لها زوايا طور لذلك فأن زاوية الطور لكمية ممثلة بنظام نسبة الوحدة هي زاوية طور الكمية الأصلية . ويخضع نظام نسبة الوحدة لقواعد الجبر المركب , فاذا كانت $Z = R \pm j\,X$ أوم (دائرة توالي مكافئة) فأن $Z_{pu} = R_{pu} \pm j\,X_{pu}$ أوم. واذا كانت $Y = G \pm j\,B$ فهو (دائرة توازي مكافئة) فأن $Y_{pu} = G_{pu} \pm jB_{pu}$. وكذلك تكون المسامحة الأساس $Y_b = Y/Y_{pu}$, $Y_b = I/Z_{pu}$.

ليس هناك شيء يدعو للغرابة حول نظام نسبة الوحدة : حيث أنه يمكن أن يستخدم في كل يوم ويجعل بيانات عددية معينة لها معنى أكثرمن أي نظام اخر فزائدي هذا المجال. فاذا كان التيار المار في دائرة ما 30 أمبيرمثلاً فأن هذه المعلومة ليست كافية بذاتها مالم يعط التيار المقرر للدائرة أيضاً . عندئذ يمكننا أن نعرف فيما اذا كانت الدائرة محملة بحمل خفيف أو بحمل زائد . فاذا كان التيار المقنن المقرر للدائرة هو 40 أمبير عليه تكون الدائرة محملة $\frac{3}{4}$ حملها المقنن ويكون التيار المار فيها هو 75% او 0.75 بنسبة الوحدة من التيار المقنن . وبالأسلوب نفسه فأن القارئ قد يكون ملم بتمثيل الكفاءة بوصفها قيمة بالنسبة المئوية وعامل القدرة بوصفه قيمة بنسبة الوحدة ، ويعطى الأنزلاق في المحركات الحثية أما بالنسبة المئوية اوبنسبة الوحدة . على عكس ذلك فأن قيمة التيار معبراً عنها بنظام نسبة الوحدة تكون لامعنى لها إلا إذا أعطيت قيمة التيار الأساس أيضا . إن الأختلاف أو التمايز بين قيم الأساس والقيم المقننة سيتم التطرق اليه في المناقشات التي ستأتي لاحقاً . ويعرف التيار المقنن (الحراري) لأية دائرة بوصفه ذلك التيار الذي يمكن للدائرة حمله بصورة مستمرة بدون تجاوزحدود الحرارة المخصصة طبقاً للمواصفات القياسية الدولية IEC .

العلاقات الرياضية التي تكون صحيحة لنظام وحدات قياسي أعتيادي تكون أيضا صحيحة في نظام نسبة الوحدة . مثال على ذلك خذ دائرة توال لها ممانعة كلية Z_t وعناصر Z_1, Z_2 ... فعليه تكون $Z_t = Z_1 + Z_2 + \cdots$ وبالقسمة على Z_b ينتج تحويل هذه المعادلة إلى نظام نسبة الوحدة بينما تبقى على وضعها الصحيح . لذا فان

$$Z_{t.pu} = Z_{1.pu} + Z_{2.pu} ..$$

من الواضح أن العبارة أعلاه يجب أن تسوغ بأضافة عبارة " شريطة أن تستعمل قيمة أساس (عامة) واحدة فقط " . وهذا الشرط قد يصبح اوضح وذلك بتعويض $Z_b = V_b/I_b$ وينتج عن ذلك

$$I_b Z_t/V_b = I_b Z_1/V_b + I_b Z_2/V_b + \cdots \qquad [1.3 م]$$

هذه المعادلة تبين أن الممانعات المعبرعنها بالأوم يجب أن تعطى بمستوى الفولتية المشترك وهو V_b (وهذه النقطة مهمة إذا ما تعلق الأمر بالمحولات الكهربائية التي سيتم التطرق إليها لاحقاً في هذا الملحق) ، كذلك يجب أستعمال تيار أساس مشترك I_b أيضاً .

بصورة عامة ، تكون لمفردات أية محطة أومشروع في منظومة قدرة فولتيات وتيارات مقننة مختلفة ، عليه عند استخدام نظام نسبة الوحدة فانه من الضروري تبديلها إلى قيمة مشتركة أو اساس واحد مشترك للتيار وكذلك الفولتية . في هذه الحالة يجب استخدام قيمة أساس بدلاً من قيمة مقننة ، لذلك

فمن المعادلة [م 1.3] تكون العلاقة التي تربط القيمة الأومية الأصلية للممانعة Z إلى قيمتها بنسبة الوحدة Z_{pu} كما يلي

$$Z_{pu} = \frac{I_b Z}{V_b} \qquad [م 1.4]$$

على هذا الاساس فان ممانعة الأجهزة والمعدات المقدرة بنسبة الوحدة تكون قيمة الكسر الناتج عن قسمة فولتية ممانعة الطور $I_b Z$ على فولتية الطور V_b المقننة الطبيعية عندما يمرفيها ذلك التيار.

مثال محلول م. 1

ممانعتان Z_1 و Z_2 مقدارهما 1+ j 2 و 2+ j2 أوم مربوطتان على التوالي عبر مصدر فولتية 250 فولت . احسب الممانعة الكلية وتيار الحمل باستخدام نظام نسبة الوحدة .

الحل: أولاً نختار قيمتي أساس للفولتية والتيار بصورة كيفية وليكونا: 200 فولت و 20 أمبير.

أي أن $V_b = 200\ V \quad , \quad I_b = 20\ A$

عليه يكون مقد ار الممانعة الأساس $Z_b = 200/20 = 10\ \Omega$

لذا فان

$$Z_{1.pu} = \frac{Z_1}{Z_b} = (1 + j2)/10 = 0.1 + j0.2\ p.u.$$

$$Z_{2.pu} = \frac{Z_2}{Z_b} = (2 + j2)/10 = 0.2 + j0.2\ p.u.$$

وتكون الممانعة الكلية بنسبة الوحدة

$$Z_{t.pu} = 0.3 + j0.4 = 0.5\angle 53.14^\circ\ \ p.u.$$

وتكون الفولتية بنسبة الوحدة

$$V_{pu} = \frac{250}{200\angle 0^\circ} = 1.25\ \angle 0^\circ$$

ويكون التيار بنسبة الوحدة

$$I_{pu} = \frac{1.25\angle 0^\circ}{0.5\angle 53.14^\circ} = 2.5\angle - 53.14^\circ\ p.u.$$

أما التيار الحقيقي فيكون

$$I = I_{pu} \times I_b = 2.5 \times 20\ A = 50\ A$$

نظام نسبة الوحدة للدوائر الثلاثية الطور

يمكن تطبيق نظام نسبة الوحدة على الدوائر الثلاثية الطوركذلك . والطريقة الأكثر بساطة , للدوائر الثلاثية الطور المتوازنة , هي ان نستعمل القيم للربط النجمي لكل طور (أي خط الى محايد) للكميات الاصلية جميعا والكميات الاساس . وعند التعامل مع دوائر متوازنة ثلاثية الطور فانه من الشائع افتراض ان هذه الدوائر مربوطة على شكل نجمي ؛ إلا إذا ذكر خلاف ذلك . أي أن الممانعات تأخذ تياراً عند فولتية خط إلى محايد .

ان قيمة نسبة الوحدة لفولتية خط الى خط تساوي قيمة نسبة الوحدة لفولتية الخط الى المحايد . وقيمة الفولت - امبير للاطوار الثلاثة المعبر عنها بنسبة الوحدة تساوي قيمة الفولت أمبير بنسبة الوحدة للطور الواحد ، على شرط أن تشكل قيم الاساس دائما منظومة ثلاثية الطور ومتوازنة . إن هذا يعنى كون فولتية الخط التي تؤخذ كأساس تساوي $\sqrt{3}$ × فولتية الأساس / الطور . وبنظام نسبة الوحدة فان الفولت - أمبير (فيما إذا أعطيت لثلاثة أطوار أو أعطيت لطور واحد) فانها تساوي حاصل ضرب الفولتية مع التيار (فيما اذا كانت قيمة الفولتية معطاة خط – إلى - خط أو خط - إلى - طور) وعليه سوف لا تظهر هناك معاملات وارقام لتحويل فولتية الخط إلى فولتية الطور مثل: 3 و $\sqrt{3}$ المعروفة.

ان نظام نسبة الوحدة يعتبر نظام وحدات منسجم كلياً ويكون وافياً لجميع صيغ الدوائرالكهربائية الاعتيادية . عليه فاذا ما تم اختياركميتين اثنتين (فقط) بصورة كيفية لتكونا أساساً فان جميع الكميات الاساس الاخرى يمكن اشتقاقها من هاتين الكميتين المعينتين كما ذكرنا ذلك سلفاً. وقد تكون هاتان الكميتان هما قدرة الاطوار الثلاثة مقدرة بالـ MVA وفولتية الخط بالـ kV (حيث انهماغالبا ما تعطى على لوحة التعريف لاية ماكنة أو جهاز) لكن الكميات الاساس يتم اختيارها لتكون القيم الطورية لها ، أو قد تأخذ القدرة للاطوار الثلاثة MVA مع فولتية الطور فقط .

عليه فاذا أخذت القيم الاساس 100 MVA (للأطوار الثلاثة) عند فولتية خط 132kV مثلاً فان القيم بنسبة الوحدة لكل طور تكون

$$MVA_{b\emptyset} = \frac{100}{3} \qquad \text{لكل طور}$$

$$V_{b\emptyset} = \frac{132}{\sqrt{3}} = 76.21 \text{ kV} \quad \text{لكل طور}$$

$$I_{b\emptyset} = \frac{MVA_{b\emptyset}}{V_{b\emptyset}} = \frac{100}{3 \times 76.21} = 0.4373\ kA \quad \text{لكل طور}$$

وتكون الممانعة بالأوم لكل طور

$$Z_{\emptyset} = \frac{V_{b\emptyset}}{I_{b\emptyset}} = \frac{76.21}{0.4373} = 174.3\ \Omega$$

يمكن إعادة كتابة المعادلة (1.4) كالآتي:

$$Z_{pu} = \frac{I_b Z}{V_b} = \frac{(3V_b I_b \times 10^{-6})Z}{(\sqrt{3}V_b \times 10^{-3})^2}$$

$$= \frac{\left(MVA\text{الأساس للأطوار الثلاثة}\right)}{\text{فولتيةالخط}(\text{kV})^2} \qquad (\text{م}1.5)$$

هذه الصيغة تربط الممانعة الأومية إلى قيمتها بنسبة الوحدة بدلالة قيمتي الأساس الاعتياديتين. فمثلاً لمولد له ممانعة أومية ثابتة معينة، فأنه ينتج من تطبيق المعادلة (1.5) أعلاه أن:

$$Z_{pu} \propto \frac{\text{الـ } MVA \text{ الاساس للأطوار الثلاثة}}{\left(\text{فولتية الخط } kV \text{ الأساس}\right)^2} \qquad (\text{م}1.6)$$

عليه فإذا ما أعطيت ممانعة الماكنة بنظام نسبة الوحدة نسبة إلى تقنينها الحراري فإنه من الممكن تحويلها إلى أية قيمة أساس باستخدام العلاقات المذكورة في أعلاه.

مثال م 2 محلول

مولد تزامني ثلاثي الطور مقنن عند 50 MVA و12.8 kV له مفاعلة طور (تزامنية) مقدارها 2.0 p.u. على تقنينه الحراري . يجهزخطاً علوياً معلقاً طوله 5 كيلومترات وكل طور منه له ممانعة 0.51 j +0.22 أوم/ كيلومتر . احسب الممانعة الكلية على أساس مقداره 100MVA (للاطوار الثلاثة) وفولتية 11kV.

الحل : نحسب في البداية التيار الأساس (لاساس 100MVA,11kV)

$$S_{b3\emptyset} = \sqrt{3} I_{b\emptyset} V_{bLine} = 100MVA$$

$$I_{b\emptyset} = \frac{100 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 11000} = 5260\ A$$

$$\text{ممانعة الخط بنظام نسبة الوحدة} = \frac{I_{b\emptyset}}{V_{bL}} \times Z = \frac{5260 \times 5(0.22 + j\ 0.51)}{11\ 000/\sqrt{3}}$$

$$= 0.91 + j\ 2.11\ p.u.$$

ومن المعادلة [م 1.4] تكون مفاعلة المولد

$$= j \frac{12800}{\sqrt{3}} \times 2.0 / \left(\frac{50 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 12800} \right) = j\ 12800^2 \times 4 \times 10^{-8} \Omega$$

ومفاعلة المولد بنسبة الوحدة عند 100MVA و 11kV هي

$$= j \frac{12800^2 \times 4 \times 10^{-8} \times 5260}{11000/\sqrt{3}} = j\ 5.42\ p.u.$$

والممانعة الكلية عند 100MVA و11kV تكون

(بنسبة الوحدة) 0.91 + j 7.53 p.u.

ينصح القارئ بتجنب حفظ معادلات غير تلك المعادلات التى تعطى العلاقات المبدئية والاساسية (حيث ان هذا يؤدي الى تقليل احتمال خطر الوقوع في الخطأ) ولهذا السبب فان المعادلة [م 1.4] قد تم استعمالها في المثال م. 2 بدلا من المعادلة [م 1.5] . على أي حال من الجدير ملاحظته أن المهندسين اعتادوا على جعل الحسابات الخاصة بحيث تقلل الجهد اللازم باستخدام علاقات معينة اخرى. ومثال على ذلك هو أن المعادلة [م 1.5] تعطي مفاعلة المولد مباشرة كالآتي

$$j\ 2.0 \times (100/50) \times (12.8/11)^2 = j\ 5.42$$

ومن [م 1.4] على القارئ ان يبين فيما اذا كانت مقاومة ماكنة 1% مقدرة بتقنينها الحراري فان الفقدI^2R عند الحمل الكلي هو 1% من تقنينة بالفولت – أمبير(VA) ان الفائدة الرئيسية من استخدام طريقة نسبة الوحدة في تحليل منظومة قدرة تظهر عندما تحتوي المنظومة على محولات . وقد يتضمن التحليل باستخدام الممانعات الأومية عن نقل الممانعات خلال المحولات باستعمال مربع نسبة اللفات حتى تكون جميع الممانعات منسوبة إلى مستوى مشترك في الفولتية عندما يتم حساب التيار في ذلك

المستوى (لاية ظروف معينة) فان ذلك التيار يجب عندها نقله خلال المحولات باستخدام معكوس نسبة اللفات وذلك لايجاد التيار عند اي مستوى آخر من الفولتية .

الآن سوف نبين ان قيمة ممانعة معطاة بنسبة الوحدة تكون متساوية على جهتى محول ذي ملفين ، وبالتشابه تكون قيمة التيار بنسبة الوحدة متساوية أيضاً على جهتي المحول نفسه شريطة أن تكون القيم الأساس على جهتي المحول منسوبة بصورة ملائمة إلى فعله الحقيقي. فاذا أشرنا بالرمز السفلي p الى جهة الابتدائي والرمز السفلي s الى جهة الثانوي عليه فاذا اعطيت V_{bp} و I_{bp} بوصفها قيم أساس على جهة الابتدائي عندئذ تكون القيم الاساس على جهة الثانوي (أفرض للسهولة محولاً احادي الطور) كالاتي

$$\begin{cases} V_{bs} = V_{bp} \times (N_s/N_p) \\ I_{bs} = I_{bp} \times (N_s/N_p) \end{cases} \qquad [1.7 \text{ م}]$$

واذا كانت Z_p هي الممانعة الاومية لملف الابتدائي فان قيمتها بنظام نسية الوحدة تكون :

$$\mathrm{Z}_{p.pu} = I_b Z_p / V_{bp},$$

وبالاسلوب نفسه فان

$$Z_{s.pu} = I_{bs} Z_s / V_{bs},$$

وعندما تنسب ممانعة الثانوي إلى الملف الابتدائي ستكون الممانعة الكلية للمحول

$$Z_p + Z_s (N_p/N_s)^2 \text{ أوم}$$

وان الممانعة بنسبة الوحدة للمحول كله على جهة الابتدائي تكون

$$= \frac{I_{bp}}{V_{bp}} (Z_p + Z_s (N_p/N_s)^2)\ p.u.$$

$$= \frac{I_{bp}}{V_{bp}} Z_p + I_{bp} \frac{N_p}{N_s} \times \frac{N_p}{N_s N_{bp}} \times Z_s\ p.u.$$

$$= \frac{I_{bp} Z_p}{V_{bp}} + \frac{I_{bs} Z_s}{V_{bs}}\ p.u.$$

$$= Z_{p.pu} + Z_{s.pu} p.u..$$

لذا فان الممانعة الكلية للمحول بنسبة الوحدة محسوبة لأي أساس من الفولتية والـ MVA تكون حاصل جمع ممانعات ملفي الابتدائي والثانوي والتي تكون قيمها بنسبة الوحدة . عليه تكون متساوية بالقيمة على جهتي المحول . من الواضح ان ممانعة أي جهاز مربوط إلى الابتدائي وله الفولتية نفسها ستكون ضمنياً مع Z_p . وممانعة أي جهاز مربوط إلى الثانوي ستكون ضمنياً أيضا مع Z_s. ولاضير في أن تكون القيم الأساس معبراً عنها بالفولت - أمبير وبالفولت . حيث أنه من الواضح أن الفولت - أمبير الأساس هي نفسها على جهتي المحول ذو الملفين .

ان التحليلات الواردة في أعلاه تطبق على محول أحادي الطور أو لمحول يكون ربطه نجمي / نجمي حيث تشير الاصطلاحات الى القيم لكل طور نجمي (خط الى محايد) . وسوف نبين الآن ان قيمة ممانعة الطور بنظام نسبة الوحدة هي نفسها إذا كان الربط نجميا أومثلثياً . تأمل ملف مثلثي الربط له ممانعة مقدرها Z أوم / طور مربوطة إلى مصدر ثلاثي الطورله فولتية خط أساساً مقدارها V_{bL} تقابل فولتية طوراساس $V_b = V_{bL}/\sqrt{3}$. والتيارالاساس في أحد الأطوارمن الملف هو I_b وهذا يقابل تيارخط اساس $I_{bL} = \sqrt{3} I_b$ وكذلك

$$Z_{pu.delat} = \frac{I_b Z}{V_{bL}}$$

الممانعة المكافئة النجمية تكون Z/3 أوم (انظر الملحق 2) وقيمتها بنسبة الوحدة تكون

$$Z_{pu.delta} = \frac{I_{bL}(Z/3)}{V_b} = \frac{\sqrt{3} I_b (Z/3)}{V_{bL}/\sqrt{3}} = Z_{pu.delta}$$

لذا فاذا أعطيت ممانعة محول في نظام نسبة الوحدة فانه ليس من الضروري معرفة ما اذا كانت الملفات نجمية أم مثلثية . إلا في التحليل النهائي وعندما يتطلب إيجاد توزيع التيارضمن المحول نفسه . وفي حالة كون المحول مربوط على شكل مثلثي / نجمي . فان تغير الطور بزاوية 30° يجب ان يعمل له حساب. وعندما تستخدم المعاد لة [م 1.4] أو [م 1.5] فمن الجوهري ان تكون الكميات على جهة اليمين جميعا معينة على جهة المحول اليمنى أيضا.

الملحق 2

تحويل الربط النجمي إلى الربط مثلثي

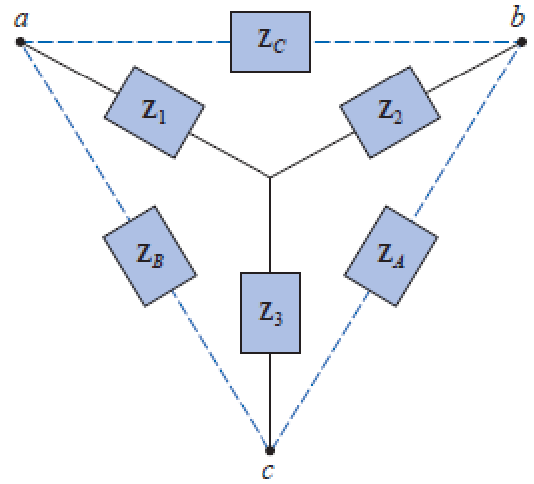
STAR-DELTA TRANSFORMATION

في أية دائرة إذا تم اعطاء الاطراف الثلاثة لها فقط (الشكل م1-1) فان الربط النجمي للممانعات الثلاثة يمكن إبداله بربط مثلثي لهذه الممانعات وبدون التأثير على الأجزاء الباقية من هذه الدائرة. والعكس يكون صحيحاً. إن مثل هذه الممانعات يشار اليها بالممانعات المكافئة وكما في معظم نظريات الشبكات يشار اليها ايضا بالممانعات الخطية.

$$\mathbf{Z}_1 = \frac{\mathbf{Z}_B\mathbf{Z}_C}{\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_B + \mathbf{Z}_C}$$

$$\mathbf{Z}_2 = \frac{\mathbf{Z}_A\mathbf{Z}_C}{\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_B + \mathbf{Z}_C}$$

$$\mathbf{Z}_3 = \frac{\mathbf{Z}_A\mathbf{Z}_B}{\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_B + \mathbf{Z}_C}$$



الشكل م 2-1 تحويل نجمي الى مثلثي

البرهان الاعتيادي على تلك المسألة يتم باحتساب الممانعات الموجودة بين أزواج الأطراف الثلاثة في كلا الدائرتين ومساواتها بمعادلات جبرية. وينتج عن هذا ثلاث معادلات آنية لثلاثة مجاهيل. عليه إذا أعطيت ممانعات الربط المثلثي الثلاث، يمكن أن نبين أن:

$$Z_1 = \frac{Z_B Z_C}{Z_A + Z_B + Z_C}$$

وذلك بتصور أن كلتا الدائرتين متراكبتان. و هذه الصيغة يمكن تعميمها كالاتي

$$Z_{star} = \frac{\text{حاصل ضرب ممانعات المثلثي عن ذلك الطرف}}{\text{مجموع الممانعات حول المثلثي}} \quad [\text{م } 2.1]$$

وبالأسلوب نفسه. إذا كانت الممانعات نجمية

$$\mathbf{Z}_B = \frac{\mathbf{Z}_1\mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_1\mathbf{Z}_3 + \mathbf{Z}_2\mathbf{Z}_3}{\mathbf{Z}_2}$$

$$\mathbf{Z}_A = \frac{\mathbf{Z}_1\mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_1\mathbf{Z}_3 + \mathbf{Z}_2\mathbf{Z}_3}{\mathbf{Z}_1}$$

$$\mathbf{Z}_C = \frac{\mathbf{Z}_1\mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_1\mathbf{Z}_3 + \mathbf{Z}_2\mathbf{Z}_3}{\mathbf{Z}_3}$$

$$Z_{delta} = \frac{\text{مجموع حاصل ضرب أزواج ممانعات النجمة}}{\text{الممانعة المقابلة الى طرفين إثنين}}$$ [م 2.2]

وإذا كانت الممانعات الثلاثة متساوية فان الصيغة تختصر إلى

$$Z_{star} = \frac{Z_{delta}}{3}$$ [م 2.3]

إن تحويل الربط النجمي إلى مثلثي يستخدم لتبسيط الشبكات المعقدة والتي غالبا ما يكون توزيع التيار فيها هو المطلوب.

الملحق 3

الفولت ـ امبير ، القدرة الفعالة والقدرة المتفاعلة

VOLT-AMPERES, ACTIVE POWER AND REACTIVE POWER

تعريف الفولت ـأمبير ، القدرة أو القدرة الفعالة ، والقدرة المتفاعلة

في آية دائرة من دوائر التيار المتناوب إذا كانت الفولتية تمثل بالمعادلة $v = \sqrt{2}V \sin \omega t$ وكذلك التيار الذي يمر فيها بالمعادلة $i = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \emptyset)$ فإن القدرة اللحظية تعطى كما يلي

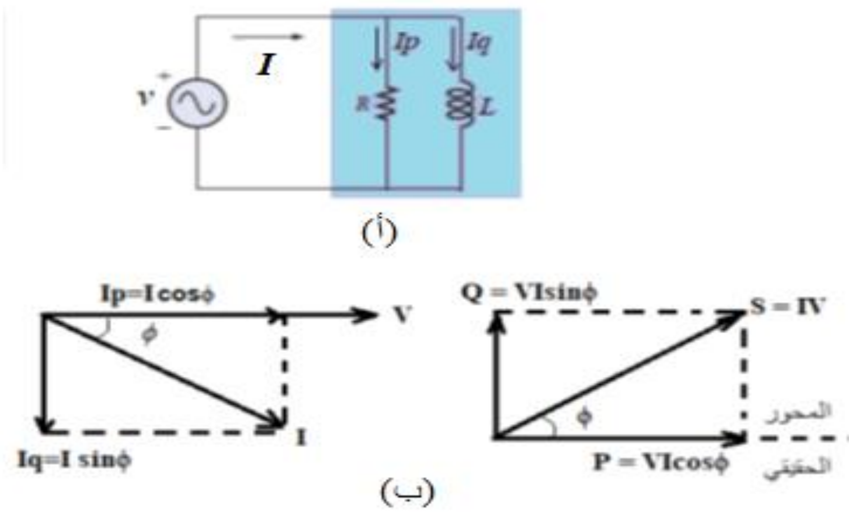
$$\text{p} = \text{vi} = \text{VI}[\cos \emptyset - \cos(2\omega t - \emptyset)] \quad \text{واط}$$

حيث أن V و I هما قيم جذر متوسط التربيع، وهذا يبين أن القدرة تحتوي على مركبات لها تردد مضاعف أي أنها تبدل إشارتها كل نصف دورة (من التردد المضاعف) وفي اتجاه جريان الطاقة وان معدلها يكون صفراً إذا ما تم أخذه على مدى عدد من الدورات الكاملة لذلك فإن معدل القدرة يكون $P = VI \cos \emptyset$ وهذه المعاد لة يمكن إعادة كتابتها بالصيغة التالية:.

$$p = VI \cos \emptyset - (VI \cos \emptyset) \cos 2\omega t - (VI \sin \emptyset) \sin 2\omega t \quad \text{واط} \quad [\text{م } 3.1]$$

حيث أن الحد الأول يعطي معدل القدرة $P = VI \cos \emptyset$ المتدفقة من المصدر إلى الحمل والذي إذا ماضرب بالزمن فسوف يعطي الطاقة المستهلكة، أما الحد الثاني فيمثل جريان قدرة متذبذب بتردد مضاعف معدل قيمته صفر واتساعه يساوي P وهذا يكون أعظم مايمكن عند عامل قدرة بقيمة واحد. ويكون صفراً عند عامل قدرة صفري. أما الحد الثالث فهو أيضاً عبارة عن تدفق قدرة متذبذب بتردد مضاعف ومعدل قيمته صفر واتساعه فهو $Q = VI \sin \emptyset$. وهذا يعني كونه صفراً عند عامل قدرة واحد. وأقصى ما يمكن عند عامل قدره صفري. إن هاتين القدرتين تكونان متعامدتين مع بعضهما في حيز الزمن.
إذا تم إعتبار الحمل محاثة ومقاومة على التوازي كما في الشكل م3-1 (أ) فان الفرع الذي يحتوي على المقاومة سوف يأخذ تياراً فعالاً مقداره $I_P = I \cos \emptyset$ ويستهلك قدرة P . وسوف تتذبذب قدرة $P \cos 2\omega t$ بين المصدر وبين الفرع ذي المقاومة R ، بينما الفرع ذو المحاثة L سوف يأخذ تياراً متفاعلاً متأخراً $I_q = I \sin \emptyset$ وستتكون هناك قدرة $Q \sin 2\omega t$ تتذبذب بين المصدر والفرع ذي المحاثة L .

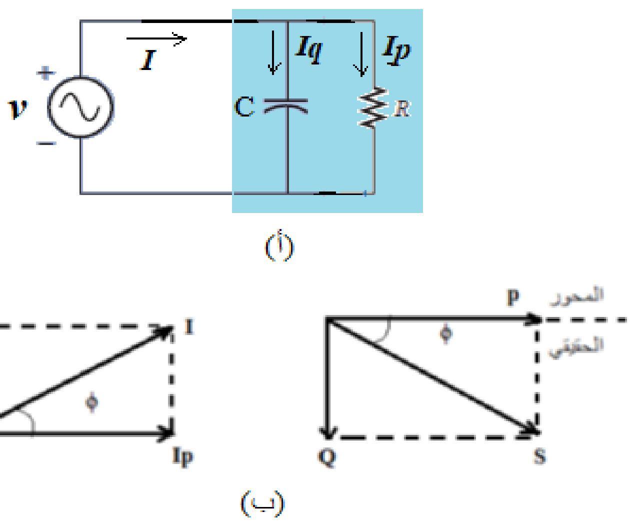
إن $Q(= VI \sin \emptyset)$ تدعى بالقدرة المتفاعلة (الفولت - امبير المتفاعلة أوvars) لهذه الدائرة، وتكتب وحداتها المناظرة بصيغة VAr. ويعد الحمل RL مصبا للقدرة P ويقال عنه انه مصب للقدرة المتفاعلة المتاخرة Q (vars). ومما يجب ملاحظته من المعادلة [م 3.1] أن Q تمثل اتساعاً لقدرة تتذبذب بتردد ضعف تردد المصدر بين المصدر نفسه وبين المجال الكهرومغناطيسي للحمل الحثي.



الشكل م 3-1 القدرة المتفاعلة (vars): (أ) الدائرة ، (ب) حمل حثي.

مما مر في أعلاه يتبين أن المولد هو مصدر للقدرة وكذلك للقدرة المتفاعلة vars المتأخرة. من ضمن الأتفاقيات العالمية فأن القدرة المتفاعلة المتأخرة التى تأخذها الأحمال الحثية والتي على هذا الأساس تتدفق في اتجاه القدرة الحقيقية نفسها، لذلك فأنها تكون ذات قيمة موجبة.

الآن إذا فرض أن الحمل هو دائرة تواز RC (الشكل م3-2 (أ)) فإنه من الواضح أن المركبة الفعالة (القدرة) للتيار I_p تبقى بالطور نفسه مع التيار المقابل في الدائرة الحثية وذلك لكون اتجاه تدفق القدرة



الشكل م3-2 القدرة المتفاعلة (vars): (أ) الدائرة ، (ب) حمل سعوي.

للدائرتين واحد. لكن المركبتين المتفاعلتين للتيار تكونان في طورين متضادين، وعليه تكون القدرتان المتذبذبتان بتردد مضاعف $Q \sin 2\omega t$ في طورين متضادين ايضاً. كذلك تكون القدرة المتفاعلة المقابلة في طورين متضادين أيضاً. لذا فأنه يمكن أعتبار القدرة المتفاعلة المقابلة في طورين متضادين أيضاً. لذا فأنه يمكن أعتبار القدرة المتفاعلة المتقدمة بوصفها قدرة متفاعلة سالبة تتدفق من المصدر الى الحمل أو بوصفها قدرة متفاعلة موجبة تتدفق من الحمل إلى المصدر. لهذا السبب فأن عمل متسعة تحسين عامل القدرة المربوطة عبر حمل حثي يمكن تفسيره بالقول أن المتسعة تولد قدرة متفاعلة متأخرة التي بدورها تجهز إلى الحمل نفسه وبذلك تقلل من الطلب على القدرة المتفاعلة المتأخرة من المصدر ذاته.

عند التعامل مع المحركات التزامنية فأن اتجاه الإسناد يأخذ دائماً بما يدخل إلى المحرك. وهذا يعني أن المحرك يأخذ تياراً وقدرة حقيقية إذا أشتغل بعامل قدرة متأخر، ففي هذه الحالة سيكون مصباً للقدرة المتفاعلة الـ vars المتأخرة، وإذا أشتغل بعامل قدرة متقدم فإنه سيكون مصباً للقدرة المتفاعلة الـ vars المتقدمة، أويكون مصدراً للقدرة المتفاعلة الـ vars المتأخرة.

فى حالة خط نقل فأن محاثة التوالى تعد مصباً للقدرة المتفاعلة المتأخرة مساوية إلى I^2X_L حيث ان $X_L = 2\pi f L$ ، بينما تعد متسعة التوازي كونها مصباً للقدرة المتفاعلة الـ vars المتقدمة (مصدرللـ vars المتاخرة) مساوية لـ V^2/X_c حيث أن $X_C = 1/2\pi f C$.

من المعتاد في منظومات القدرة الأشارة دائماً الى الـ vars المتأخرة (ولايشارالى القدرة المتفاعلة المتقدمة). لذا فاذا كانت محطة قدرة تولد بعامل قدرة متأخر فيقال عنها أنها تصدر الواطات وكذلك الـ vars (المتأخرة) بينما إذا كانت تولد عند عامل قدرة متقدم يقال عنها أنها تصدر الواطات وتستورد القدرة المتفاعلة (إن أستيراد القدرة المتفاعلة المتأخرة (الموجبة) يكون مكافئاً لتصدير القدرة المتفاعلة المتقدمة (السالبة)). والشكل م 3-3 يبين الفولتية عبر حمل ما وقد رسم التيار خلال هذا الحمل بأتجاهات كيفية نسبة إلى مجموعة من محاور تربيعية، إلا أن I يتأخرعن V بزاوية قدرها Ø.

$$P = VI \cos \emptyset = VI \cos(\alpha - \beta)$$

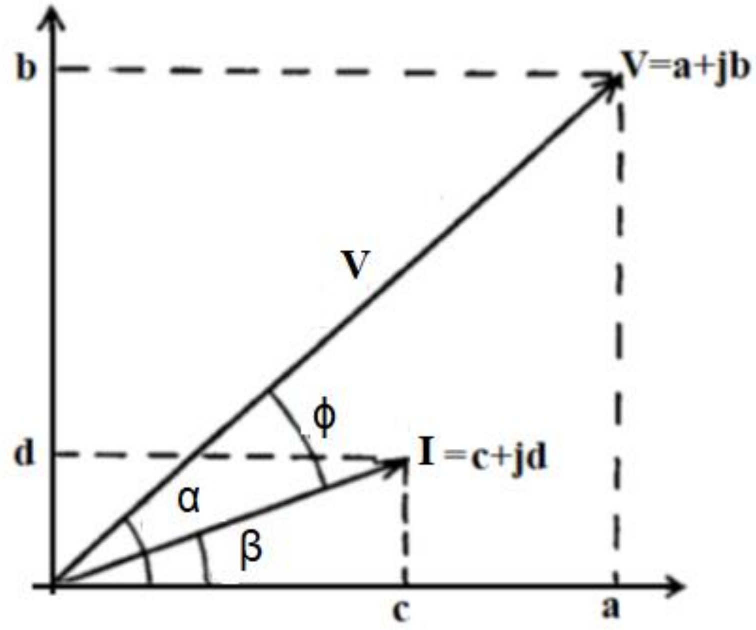
$$= VI[(\cos \alpha)(\cos \beta) + (\sin \alpha)(\sin \beta)]$$

$$= ac + bd$$

$$Q = VI \sin \emptyset$$

$$= VI[(\sin \alpha)(\cos \beta) - (\cos \alpha)(\sin \beta)]$$

$$= bc - ad$$



الشكل م 3-3 المركبات التربيعية (الأفقية والشاقولية) للفولتية V والتيار I.

وتفسير هذه المعادلات هو أن ac يمثل القدرة المتسببة عن مركبة الفولتية ومركبة التيار كليهما على المحور السينى، وبالتشابه bd على المحور الصادي وأن هذه المركبات تجمع إلى بعضها حسابياً حيث تمثل bc أيضاً القدرة المتفاعلة المتسببة عن مركبة تيار متاخرة عن مركبة فولتية بينما ad تمثل القدرة المتفاعلة بالنسبة إلى مركبة تيار تتقدم على مركبة فولتية.

قد يلاحظ منطقياً محاولة الحصول على الفولت ـ أمبير من حاصل ضرب الفولتية والتيار بوصفها أعداداً مركبة، لذلك

$$(a + j\, b)(c + j\, d) = (ac - bd) + j(bc + ad)$$

وهذه النتيجة تكون غير صحيحة بصورة واضحة. أما النتيجة الصحيحة فيمكن الحصول عليها باستخدام مترافق التيار *I في مكان التيار نفسه حيث

$$I^* = I \angle -\beta = c - jd$$

عليه فان

$$S = VI^* = (a + j\, b)(c - j\, d)$$

$$= (ac + bd) + j\,(bc - ad)$$

$$= P + j\ Q$$

ويتفق استخدام مترافق التيارمع اصطلاح القدرة المتفاعلة المتأخرة المأخوذة باشارة موجبة عندما تتدفق إلى حمل حثي في اتجاه القدرة نفسه.

ومع أن القدرة الحقيقية بلواط والقدرة المتفاعلة بالفولت - أمبير كليهما ليستا مطاورات بحد ذاتها، إلا انها تعد متجهات وذلك لكونها تمتلك اتجاهات بالنسبة إلى بعضها البعض، لذا لكي يكون الدخل بالفولت – أمبير لحمل معين نستطيع أن نعبر عنه كالتالي:

$$S = P + j\ Q$$

وبأخذ فولتية الحمل بوصفها مطاوراً مرجعاً فإن تيار الحمل المقابل يكون

$$I = I_p - jI_q$$

ولما كانت طبيعة المهندسون في معاملة معظم الكميات التي تتكرر دائماً (مثل القدرة المتفاعلة المتاخرة) على أنها كميات موجبة قد أدت إلى هذا التضارب الظاهري في الإشارة. وطبقاً للمواصفات القياسية الدولية فان الفولت - أمبير يطلق عليها إسم " القدرة الظاهرية".

References المراجع الأجنبية

1. Steinmetz, C.P. – *Power control and stability of electric generating stations*, AIEETrans., Vol. XXXIX, Part II, pp. 1215–1287, July 1920.
2. AIEE Subcommittee on interconnections and stability factors – *First report of power system stability*, AIEE Trans., pp. 51–80, 1926.
3. Kundur, P., Paserba, J., Ajjarapu, V., Andersson, G., Bose, A., Canizares, C., Hatziargyriou, N., Hill, D., Stankovic, A., Taylor, C., Van Cutsem, T., Vittal, V. –*Definition and classification of power system stability*, IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability terms and definitions, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 1387-1401, May 2004.
4. Vorotnikov, V.I. – *Partial stability and control*, Birkhauser, Cambridge, MA, 1998.
5. Rumyantsev, V.V. and Osiraner, A. S. – *Stability and stabilization of motion with respect to a part of the variable*", Nauka, Moscow, Russia, 1987.
6. Rouche, N., Habets , P., and Laloy, M. – *Stability theory by Liapunov's direct method* , Springer, New York, 1977.
7. Kundur, P. – *Power system stability and control*, McGraw- Hill, New York, 1994.
8. Eremia, M., Trecat, J., Germond, A. – Réseau électriques. Aspects actuels, Editura Tehnică, Bucharest, 2000.
9. Barbier, C. and Barret, J.P. – *An analysis of phenomena of voltage collapse on transmission systems*, Revue Generale d'Electricite, pp. 672 – 690, October 1980.
10. CIGRE TF 38-01-03 – *Planning against voltage collapse*, Electra, No. 111, pp. 55– 75, March, 1987.
11. IEEE Special Publication 90TH0358-2-PWR – *Voltage stability of power systems:concepts, analytical tools, and industry experience*, New Jersey, 1990.
12. Gao, B., Morison, G.K. and Kundur, P. – *Voltage stability evaluation using modal analysis*, IEEE, Vol. PWRS – 7, No. 4, pp. 1529 – 1542, November 1992.
13. Van Cutsem, T. – *Voltage instability: Phenomenon, countermeasures and analysis methods*, Proc. IEEE, Vol. 88, pp. 208–227, 2000.
14. Morison, G.K., Gao, B., and Kundur, P. – *Voltage stability analysis using static and dynamic approaches*, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, pp. 1159–1171, August 1993.
15. Barbier, C., Carpentier, L., and Saccomanno, F., CIGRE SC32 Report *Tentative classification and terminologies relating to stability problem of power systems*, Electra, No. 56, 1978.
16. Van Cutsem, T. and Vournas, C. – *Voltage stability of electric power systems*, MA: Kluwer Academic Publisher, Norwell, 2001.
17. Taylor, C. W. – *Power system voltage stability*, McGraw- Hill, New York, 1994.

18. Gao, B., Morison, G. K., and Kundur, P. – *Toward the development of a systematic approach for voltage stability assessment of large-scale power systems*, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, pp. 1314–1324, August 1996.
19. Săvulescu, S. (Editor) – *Real time stability assessment in modern power system control*, IEEE Press Series on Power Engineering and John Wiley & Sons, USA, 2009.
20. Lof, P.A., Smed, T., Andersson, G. and Hill, D. J. – *Fast calculation of a voltage stability index*, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, pp. 54–64, February 1992.
21. CIGRE Task Force 38.02.14 Rep. – *Analysis and modelling needs of power systems under major frequency disturbances*, January 1999.
22. Kimbark. E.W. – *Power System Stability*, Vol. I, Wiley-IEEE, 1995.
[8.23] Chow, Q. B., Kundur, P., Acchione, P. N. and Lautsch, B. – *Improving nuclear generating station response for electrical grid islanding*, IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. EC-4, pp. 406–413, September 1989.
24. Hatziargyriou, N., Karapidakis, E. and Hatzifotis, D. – *Frequency stability of power system in large islands with high wind power penetration*, Bulk Power Syst. Dynamics Control Symp. – IV Restructuring, Vol. PAS-102, Santorini, Greece, 24–28, 1998.
25. Dy Liacco, T.E. – *Control of power systems via the multi-level concept*, CaseWestern Reserve Univ., Syst. Res. Center, Rep. SRC-68-19, June 1968.
26. Machowski, J., Bialek, J., Bunchy, J. – *Power system dynamics and stability*, John Wiley & Sons, 1997.
27. Anderson, P.M., Agrawal, B.L., Van Ness, V.E. – *Subsynchronous resonance in power systems*, IEEE Press, New York, 1990.
28. Grigsby, L. – *Power system stability and control*, CRC Press, 2007.
29. Zhdanov, P.S. – *Power system stability* (in Russian), 1948.
30. Xu, W., Mansour, Y. – *Voltage stability analysis using generic dynamic load models*, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 1, 1994.
31. Concordia, C – *Voltage instability*, Electrical Power and Energy Systems, Vol. 13, No. 1, February 1991.
32. AEMO. Renewable Integration Study: Stage 1 Report; Australian Energy Market Operator: Melbourne, Australia, 2020; p. 75.
33.. Annakage, U.D.; Mehrizi-Sani, A.; Rajapakse, A.; Hauser, C.; Bhargava, B.;Wadduwage, D.P.; Chauduri, N.R.; Ribeiro Campos Andrade, S.; Perez Castro, J.; Chakrabortty, A.; et al. Application of Phasor Measurement Units for Monitoring Power System Dynamic Performance; CIGRÉ: Paris, France, 2017.
34. O'Sullivan, J.; Rogers, A.; Flynn, D.; Smith, P.; Mullane, A.; O'Malley, M. Studying the Maximum Instantaneous Non-Synchronous Generation in an Island System—Frequency Stability Challenges in Ireland. IEEE Trans. Power Syst. **2014**, 29, 2943–2951.
35. EirGrid. Operational Constraints Update; EirGrid: Dublin, Ireland, 2019.

36. Australian Energy Market Operator (AEMO). Inertia Requirements Methodology: Inertia Requirements & Shortfalls; Australian Energy Market Operator (AEMO): Melbourne, Australia, 2018; p. 46.
37. Stieneker, M.; De Doncker, R.W. Medium-voltage DC distribution grids in urban areas. In Proceedings of the 2016 IEEE 7th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Vancouver, BC, Canada, 27–30 June 2016; pp. 1–7.
38. Fox, B.; Bryans, L.; Flynn, D.; Jenkins, N.; Milborrow, D.; O'Malley, M.;Watson, R.; Anaya-Lara, O.Wind Power Integration: Connection and System Operational Aspects; The Institution of Engineering and Technology: London, UK, 2014; ISBN 978-1-84919-494-5.
39. Meegahapola, L.; Datta, M.; Nutkani, I.; Conroy, J. Role of fault ride-through strategies for power grids with 100% power electronic-interfaced distributed renewable energy resources. WIREs Energy Environ. **2018**, 7, e292.
40. Kundur, P.; Paserba, J.; Ajjarapu, V.; Andersson, G.; Bose, A.; Canizares, C.; Hatziargyriou, N.; Hill, D.; Stankovic, A.; Taylor, C.; et al. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. IEEE Trans. Power Syst. **2004**, 19, 1387–1401.
41. Meegahapola, L.; Flynn, D. Impact on transient and frequency stability for a power system at very high wind penetration. In Proceedings of the IEEE PES General Meeting, Providence, RI, USA, 25–29 July 2010; pp. 1–8.
42. Nunes, M.V.A.; Lopes, J.A.P.; Zurn, H.H.; Bezerra, U.H.; Almeida, R.G. Influence of the variable-speed wind generators in transient stability margin of the conventional generators integrated in electrical grids. IEEE Trans. Energy Convers. **2004**, 19, 692–701.
43. Meegahapola, L.; Flynn, D.; Littler, T. Transient stability analysis of a power system with high wind penetration. In Proceedings of the 2008 43rd International Universities Power Engineering Conference, Padova, Italy, 1–4 September 2008; pp. 1–5.
44. Gautam, D.; Vittal, V.; Harbour, T. Impact of Increased Penetration of DFIG-Based Wind Turbine Generators on Transient and Small Signal Stability of Power Systems. IEEE Trans. Power Syst. **2009**, 24, 1426–1434.
45. Shi, L.; Dai, S.; Ni, Y.; Yao, L.; Bazargan, M. Transient stability of power systems with high penetration of DFIG based wind farms. In Proceedings of the 2009 IEEE Power Energy Society General Meeting, Calgary, AB, Canada, 26–30 July 2009; pp. 1–6.
46. Munkhchuluun, E.; Meegahapola, L.; Vahidnia, A. Impact on rotor angle stability with high solar-PV generation in power networks. In Proceedings of the 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), Torino, Italy, 26–29 September 2017; pp. 1–6.
47. Vittal, E.; O'Malley, M.; Keane, A. Rotor Angle Stability with High Penetrations of Wind Generation. IEEE Trans. Power Syst. **2012**, 27, 353–362.

48. Mitra, A.; Chatterjee, D. Active Power Control of DFIG-Based Wind Farm for Improvement of Transient Stability of Power Systems. IEEE Trans. Power Syst. **2016**, 31, 82–93.
49. Munkhchuluun, E.; Meegahapola, L.; Vahidnia, A. The Large Disturbance Rotor Angle Stability with DFIG Wind Farms. In Proceedings of the 2019 9th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), Perth, Australia, 10–12 December 2019; pp. 1–6.
50. Yousefian, R.; Bhattarai, R.; Kamalasadan, S. Transient Stability Enhancement of Power Grid with Integrated Wide Area Control of Wind Farms and Synchronous Generators. IEEE Trans. Power Syst. **2017**, 32, 4818–4831.
51. Darabian, M.; Jalilvand, A. Improving power system stability in the presence of wind farms using STATCOM and predictive control strategy. IET Renew. Power Gener. **2018**, 12, 98–111.
52. Meegahapola, L.G.; Littler, T.; Flynn, D. Decoupled-DFIG Fault Ride Through Strategy for Enhanced Stability Performance During Grid Faults. IEEE Trans. Sustain. Energy **2010**, 1, 152–162.
53. Edrah, M.; Lo, K.L.; Anaya-Lara, O. Impacts of High Penetration of DFIG Wind Turbines on Rotor Angle Stability of Power Systems. IEEE Trans. Sustain. Energy **2015**, 6, 759–766.
53. Papadopoulos, P.N.; Milanovi´c, J.V. Probabilistic Framework for Transient Stability Assessment of Power Systems with High Penetration of Renewable Generation. IEEE Trans. Power Syst. **2017**, 32, 3078–3088.
54. Diaz-Alzate, A.F.; Candelo-Becerra, J.E.; Villa Sierra, J.F. Transient Stability Prediction for Real-Time Operation by Monitoring the Relative Angle with Predefined Thresholds. Energies **2019**, 12, 838.
55. Wu, Y.; Badesa, L.; Musavi, M.T.; Lerley, P. Monitoring power system transient stability using synchrophasor data. In Proceedings of the 2015 IEEE Power Energy Society General Meeting, Denver, CO, USA, 26–30 July 2015; pp. 1–5.
56. Lee, D.-J.; Wang, L. Small-Signal Stability Analysis of an Autonomous Hybrid Renewable Energy Power Generation/Energy Storage System Part I: Time-Domain Simulations. IEEE Trans. Energy Convers. **2008**, 23, 311–320.
57. Xi, X.; Geng, H.; Yang, G. Enhanced model of the doubly fed induction generator-based wind farm for small-signal stability studies of weak power system. IET Renew. Power Gener. **2014**, 8, 765–774.
58. Bu, S.Q.; Du, W.; Wang, H.F.; Chen, Z.; Xiao, L.Y.; Li, H.F. Probabilistic Analysis of Small-Signal Stability of Large-Scale Power Systems as A_ected by Penetration of Wind Generation. IEEE Trans. Power Syst. **2012**, 27, 762–770.
59. Anderson, P.; Fouad, A.A. Power System Control and Stability, 1st ed.; Iowa State University Press: Ames, IA, USA, 1977.

60. Oudalov, A.; Chartouni, D.; Ohler, C. Optimizing a Battery Energy Storage System for Primary Frequency Control. IEEE Trans. Power Syst. **2007**, 22, 1259–1266.
61. Galus, M.D.; Koch, S.; Andersson, G. Provision of Load Frequency Control by PHEVs, Controllable Loads, and a Cogeneration Unit. IEEE Trans. Ind. Electron. **2011**, 58, 4568–4582.
62. Wang, Y.; Delille, G.; Bayem, H.; Guillaud, X.; Francois, B. High Wind Power Penetration in Isolated Power Systems—Assessment of Wind Inertial and Primary Frequency Responses. IEEE Trans. Power Syst. **2013**, 28, 2412–2420.
63. Lalor, G.; Mullane, A.; O'Malley, M. Frequency control and wind turbine technologies. IEEE Trans. Power Syst. **2005**, 20, 1905–1913.
64. Molina-García, A.; Bou_ard, F.; Kirschen, D.S. Decentralized Demand-Side Contribution to Primary Frequency Control. IEEE Trans. Power Syst. **2011**, 26, 411–419.
65. Yingcheng, X.; Nengling, T. Review of contribution to frequency control through variable speed wind turbine. Renew. Energy **2011**, 36, 1671–1677.
66. Rebours, Y.G.; Kirschen, D.S.; Trotignon, M.; Rossignol, S. A Survey of Frequency and Voltage Control Ancillary Services—Part I: Technical Features. IEEE Trans. Power Syst. **2007**, 22, 350–357.
67. Blaabjerg, F.; Chen, Z.; Kjaer, S.B. Power electronics as e_cient interface in dispersed power generation systems. IEEE Trans. Power Electron. **2004**, 19, 1184–1194.
68. Carrasco, J.M.; Franquelo, L.G.; Bialasiewicz, J.T.; Galvan, E.; Portillo Guisado, R.C.; Prats, M.A.M.; Leon, J.I.; Moreno-Alfonso, N. Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey. IEEE Trans. Ind. Electron. **2006**, 53, 1002–1016.